

Липецкий государственный технический университет

Факультет автоматизации и информатики

Кафедра автоматизированных систем управления

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ

РАБОТА МАГИСТРА

по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»

тип программы «Академическая»

профиль «Информационное и программное обеспечение

автоматизированных систем»

Моделирование и разработка сервиса заказа температуры плавки на УНРС

Студент

Тюрин А.С.

Группа M-AC-18-1

Руководитель

Сараев П.В.

д.т.н., доцент

Консультант по программному

Домашнев П.А.

обеспечению

к.т.н.

Нормоконтроль

Гаев Л.В.

к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой

Алексеев В.А.

к.т.н.

Липецк 2020 г.

ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет ФАИ
Кафедра АСУ

Зав. кафедрой Алексеев В.А

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Студенту Тюрину Алексею Сергеевичу группы М-АС-18-1

Направление(специальность) Информатика и вычислительная техника

1. Тема Моделирование и разработка сервиса заказа температуры плавки на УНРС
2. Цель и задачи работы Цель данного проекта заключается в построении математической модели падения температуры на участке производства УПК-УНРС на основе фактических данных о работе данного участка и разработке сервиса заказа температуры для применения модели в производстве на рабочих местах операторов разливки, сталеваров и начальников участка. Задачи: литобзор, постановка задачи; изучение и моделирование предметной области; разработка и реализация модели падения температуры стали; реализация информационной системы, анализ результатов
3. Характеристика предметной области Предметной областью является прогнозирование падения температуры на участке производства УПК-УНРС. Модель падения температуры основывается на фактических данных о работе участка производства за последние несколько лет и строится при помощи различных методов машинного обучения.
4. Содержание расчетно-пояснительной записки введение, постановка задачи, изучение и моделирование предметной области, проектирование системы, реализация системы, представление и анализ полученных результатов, заключение (выводы), список источников

5. Перечень графического материала иллюстрации предметной области: схема установок конвертерного цеха
6. Срок сдачи ВКР руководителю _____
7. Консультанты по ВКР Домашнев П.А., Гаев Л.В
8. Дата выдачи задания _____
9. Руководитель проекта д.т.н., доцент, Сараев Павел Викторович
10. Представитель организации-заказчика ПАО «НЛМК» Баженов В.А.
11. Задание принял к исполнению студент Тюрин Алексей Сергеевич

Аннотация

С. 61. Ил. 29. Табл. 12. Литература 27 назв.;

Настоящий отчет является пояснительной запиской по выпускной квалификационной работе магистра «Моделирование и разработка сервиса заказа температуры плавки на УНРС».

Цель работы заключается в построении математической модели падения температуры на участке производства УПК-УНРС на основе фактических данных о работе данного участка и разработке сервиса заказа температуры для применения модели в производстве на рабочих местах операторов разливки, сталеваров и начальников участка. В данном отчете приводится описание построения модели и оценка ее точности как на тестовых данных, так и в условиях реального производства.

Спроектированная система позволяет оперативно получать рекомендации температуры отдачи стали с УПК для минимизации превышения минимально допустимой температуры в промковше на УНРС. Также система предоставляет начальникам участка инструменты аналитики для оперативного разбора текущей работы.

Оглавление

Введение	6
1 Постановка задачи	7
1.1 Обзор предметной области	7
1.2 Литературный и патентный обзор постановки подобных задач. Анализ стандартных средств и существующих способов реше- ния задачи	8
1.3 Постановка задачи. Цели работы, критерии оценки и ограни- чения	16
1.3.1 Постановка задачи	16
1.3.2 Критерии оценки системы	16
1.3.3 Основные ограничения	17
2 Изучение и моделирование предметной области	18
2.1 Выявление основных понятий и процессов	18
2.1.1 Сталеразливочный ковш	18
2.1.2 УПК	20
2.1.3 УДМ	23
2.1.4 УНРС	25
2.2 Теоретическое изучение предметной области	27
2.3 Экспериментальное изучение предметной области	31
2.3.1 Квантильная регрессионная модель	32
2.3.2 Медианная регрессионная модель	33
2.3.3 Анализ и интерпретация результатов экспериментов .	35
3 Проектирование системы	38
3.1 Общая архитектура системы	38
3.2 Концептуальная и физическая модель данных	40
3.3 Макеты интерфейсов пользователя	44
3.4 Формы отчетов	45
4 Реализация системы	46
4.1 Аппаратное обеспечение	46

4.2 Информационное обеспечение	46
4.3 Программное обеспечение	47
4.4 Разработанные программные средства	48
4.4.1 Структура проекта	48
4.4.2 Средства оркестрации контейнеров	50
4.4.3 Backend микросервис	50
4.4.4 Frontend микросервис	51
5 Представление и анализ полученных результатов	53
Заключение	57
Список источников	59

Введение

Металлургическая промышленность активно накапливает большие объемы неструктурированных данных, которые могут быть полезными для оптимизации многих производственных процессов, начиная от закупки сырья до реализации готовой продукции. Оптимизация может быть выражена в виде сокращения излишнего расходования материалов, снижении простоев оборудования, своевременной диагностики неполадок на оборудовании. В контексте сталеплавильного производства существует процесс заказа температуры на агрегате непрерывной разливки стали, который может быть оптимизирован благодаря использованию технологий машинного обучения. Применение технологий машинного обучения на данном участке производства может принести экономический и технологический эффект для предприятия. Как правило, человек зачастую не располагает достаточными сведениями о текущем процессе либо не учитывает полный набор значимых параметров (современные модели способны учитывать тысячи входных параметров). Применение же различных математических моделей позволяет компенсировать человеческий фактор.

Разрабатываемая система призвана устраниТЬ перерасходы электроэнергии на установках пеЧь-ковш за счет более точного определения требуемой температуры отдачи плавки и определения оптимальных режимов подогрева металла. Кроме того, система сможет формировать отчетности для начальников участков для мониторинга работы бригад разливки и сталеваров. Интеграция с производственными системами обработки данных предприятия может позволить использовать разрабатываемый сервис заказа температуры в единой информационной системе для конвертерного цеха, которая будет охватывать все участки производства.

1 Постановка задачи

1.1 Обзор предметной области

Металлургическая отрасль относится к одной из самых энергоёмких отраслей современной экономики. При производстве стали и чугуна расходуются гигантские объемы энергии. Одним из обязательных условий повышения эффективности работы является снижение затрат на энергию [1].

Современное производство стали делится на несколько крупных производств, одним из которых является сталеплавильное производство. Сталеплавильное производство включает в себя мартеновские и электродуговые печи, конвертеры. Физико-химические процессы на этих агрегатах невероятно сложны и плохо поддаются точному регулированию, что повлекло за собой развитие последующей обработки стали. Такая обработка стали называется внепечной (внепечная металлургия). В настоящий момент производство высококачественных марок стали невозможно реализовать без порошковой внепечной обработки [2]. Внепечная обработка стали позволяет достичь высокого уровня качества стали и повысить производительность сталеплавильного производства. Кроме того, внепечная обработка обеспечивает значительное упрощение конвертерных процессов, так как доводка химии осуществляется на последующих этапах. Самым главным достоинством внепечной обработки является возможность достаточно точно регулировать температуру стали при разливке на установке непрерывной разливки стали (УНРС), обеспечивать высокие характеристики по химическому составу и низкому содержанию шлака.

Высокое качество стали достигается следующими значимыми металлургическими процессами:

- выравнивание химического состава и температур стали – применением продувки инертными газами;
- глубокое обезуглероживание (содержание углерода менее 0,02 %), углеродное раскисление, низкое содержание оксидных включений, дегазация – вакуумированием;

- десульфация (содержание серы до 0,003%) – при помощи продувок порошками и обработкой шлаком.

Благодаря обработке стали в сталеразливочных ковшах появляется возможность соблюдать режимы выдержки для УНРС для обеспечения оптимальных температурных режимов разливки. Все вышеперечисленные качества стали достигаются благодаря созданию наиболее благоприятных термодинамических условий для обработки.

В общем случае внепечная обработка стали включает в себя следующие агрегаты:

- установка доводки металла (УДМ);
- агрегат циркуляционного вакуумирования (АЦВ);
- установка «печь-ковш» (УПК);
- сталеразливочный ковш;
- самоходная сталевозная тележка;
- пробоотборник;
- система очистки пыли.

После внепечной обработки сталь поступает на разливку, откуда получают заготовки для горячего проката [3].

1.2 Литературный и патентный обзор постановки подобных задач. Анализ стандартных средств и существующих способов решения задачи

Задачи прогнозирования температуры жидкой стали в стальковшах решалась на многих металлургических предприятиях. Так, в [4] приводится описание разработанной математической модели на основе применения алгоритма машинного обучения и вероятностно - графической модели (ВГМ и байесовские сети / PGM - probabilistic graphical models). Прогнозирование осуществляется на основании анализа набора технологических параметров конкретной текущей плавки по всему маршруту производства, а также по статистическим данным оборота и состояния сталеразливочного ковша.

Авторы отмечают, что при построении модели не рассматривались физические модели процессов (классической тепловой модели с учетом тепловых потерь), так как в условиях решаемой задачи присутствует большое количество факторов. Целый ряд таких факторов плохо поддается параметризации и определению. Вместо монолитной сложной модели авторы пошли путем разработки комбинированной модели, содержащей в себе элементы статистики и экспертных знаний. Ниже приведен перечень разработанных моделей:

- регрессионная модель на основе дерева решений;
- регрессионная модель на основе случайного леса;
- регрессионная модель на основе градиентного бустинга на решающих деревьях.

В окончательном варианте наилучшее качество показала модель, построенная по алгоритму градиентного бустинга.

Также в данной статье приводится перечень самых значимых факторов. В таблице 1 приводится топ-10 самых значимых факторов на маршруте обработки УПК-УНРС. Модель выявила заметную значимость фактора «основность шлака $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ в ковше», которая имеет различное относительное значение влияния для различных технологических маршрутов.

Таблица 1 – Относительная значимость факторов для моделей по маршруту УПК-УНРС

№ п/п	Факторы	Условная оценка значи- мости
1	Запрашиваемая температура отдачи с УПК на УНРС, $^{\circ}\text{C}$	4,3106
2	Температура металла в промковше УНРС на плавке, разлитой перед текущей плавкой в этой же серии, $^{\circ}\text{C}$	3,4060

Окончание таблицы 1

№ п/п	Факторы	Условная оценка значи- мости
3	Продолжительность нахождения сталеразливочного ковша без металла, мин.	2,8615
4	Полная основность шлака в стальковше $(CaO/(Al_2O_3+SiO_2))$	2,7305
5	Выдержка стали между УПК и УНРС, мин.	1,5367
6	Температура футеровки стальковша перед выпуском плавки, $^{\circ}C$	0,8870
7	Последний замер температуры на УПК, мин.	0,6921
8	Температура металла в промковше УНРС на плавке, разлитой за две перед текущей плавкой в этой же серии, $^{\circ}C$	0,6025
9	Продолжительность нахождения металла в стальковше, мин.	0,5486
10	Стойкость оgneупоров стальковша в зоне шлакового пояса, кол-во плавок	0,4052

Исходя из приведенных в таблице данных следует, что большое значение имеют исторические данные для используемого в данный момент стальковша и промежуточного ковша. Технологический эффект оценивается авторами в снижение потребления электроэнергии до 0,75 кВт*ч/т и снижении на 1% расход электродов на УПК за счёт оптимизации теплового баланса металла в стальковше.

На рисунке 1 приводится изображение технологической цепочки в сталеплавильном цехе и некоторые факторы, оказывающие влияние на изменение температуры стали в стальковше и промковше (МНЛЗ – машина непрерывной разливки стали).

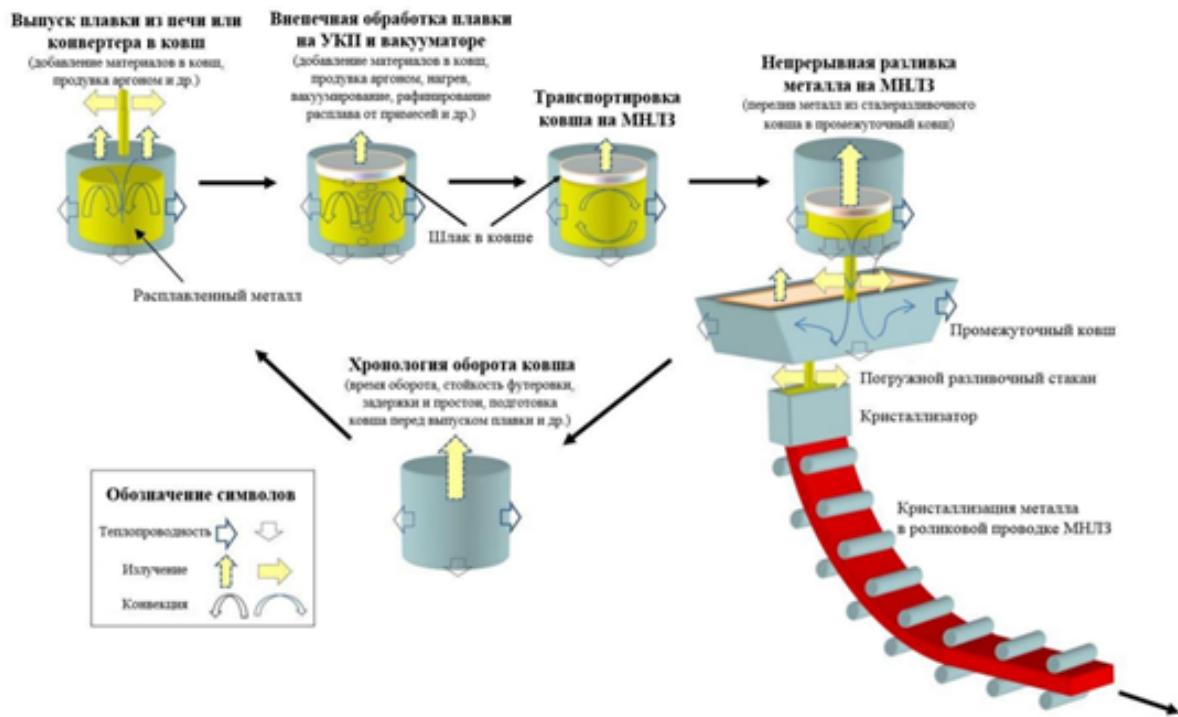


Рисунок 1 – Технологическая цепочка в сталеплавильном цехе

Во время выполнения работы авторами перечень используемых факторов дополнялся и уточнялся. Например, были добавлены параметры, касающиеся оборота стальковшей и стойкости их футеровки, химический состав шлака в ковше и др. Указанные факторы вошли в окончательный перечень параметров, отобранных алгоритмами для расчёта температуры металла в промковше и позволили заметно увеличить точность моделей.

В итоге точность разработанной модели по прогнозу температуры достигла $5,4^{\circ}\text{C}$ для невакуумированного металла, а для вакуумированного $5,9^{\circ}\text{C}$. Аналогичные исследования были проведены в Финляндии, на предприятии Ruukki Raahe Steelworks, в США на SSAB MOBILE и SeverStal Columbs, в Канаде на Evraz Regina Steel.

Результаты оценки точности модели приводятся на рисунке 2 (УКП – установка ковш-печь, ВД – вакуумный дегазатор). Сравнение аналогичных моделей приводится в таблице 2.

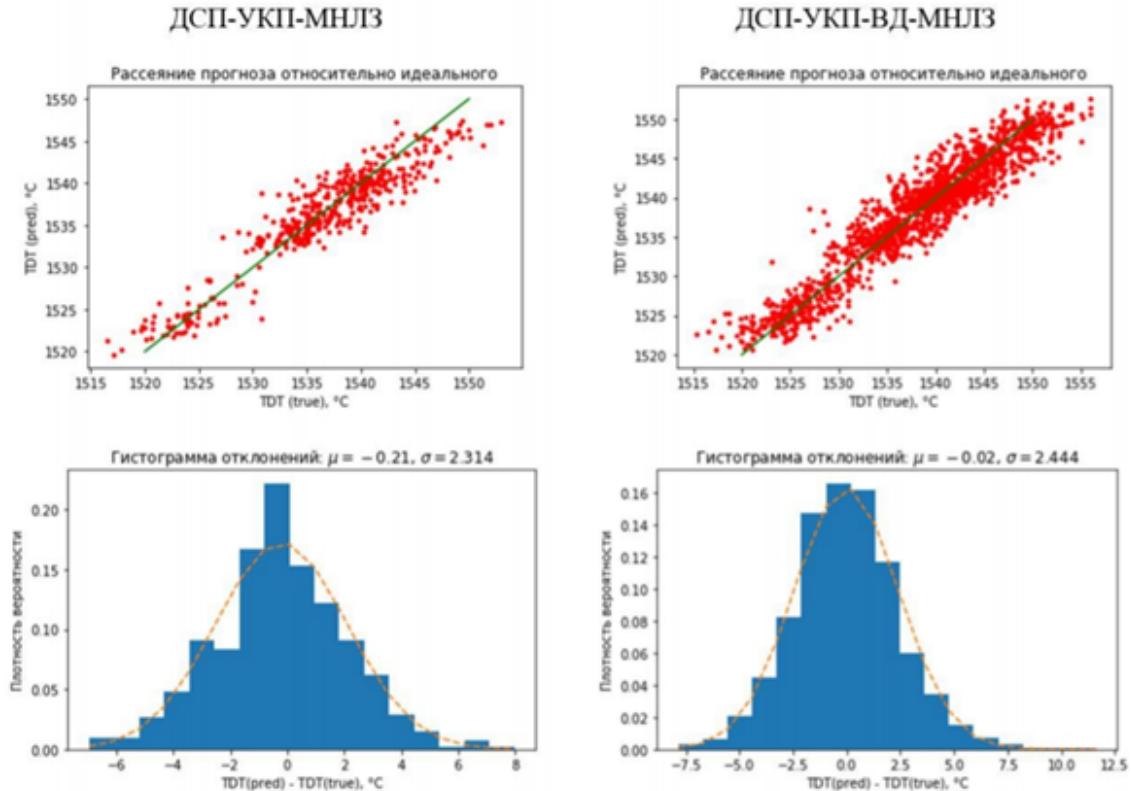


Рисунок 2 – Рассеяние и точность прогноза температуры металла по двум технологическим маршрутам плавок

Таблица 2 – Сравнение математических моделей на различных предприятиях

Название предприятия	Тип математической модели
Ruukki Raahe Steelworks [5] - [6]	Гибридная модель, основанная на тепловом статусе ковша, статистики и нейронной сети. В качестве метода моделирования использовалась нейронная сеть с байесовским многослойным персептроном (MLP – multilayer perceptron) для задач регрессии

Окончание таблицы 2

Название предприятия	Тип математической модели
SSAB MOBILE [7]	1.Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics - CFD) и методы конечных элементов (Finite Element Method - FEM); 2. Комбинация аналитических и статистических моделей.
SeverStal Columbs [8]	Материальный и тепловой баланс. Дополнительно применялся химический модуль для расчёта отдачи необходимого количества материалов в ковш.
Evraz Regina Steel [9] - [10]	Комплексная автономная модель прогнозирования температуры металла в сталеразливочном ковше, состоящая из offline и online модулей с функцией самообучения.

На всех рассмотренных предприятиях отмечается снижение перегрева металла на момент начала разливки на УНРС, повышение общей производительности цеха. В [11] приводится описание моделирования охлаждения чугуна в разливочных ковшах. В основе модели лежат реальные физические процессы, а сама модель была выполнена в программе «ProCast 2013.5», что исключает возможность использование полученной модели в онлайн-режиме для расчётов рекомендаций по нагреву металла. Похожая работа была проделана в [12] при построении одномерной математической модели охлаждения металла в 385-тонном сталеразливочном ковше. Данная математическая модель является физической моделью и использует следующие исходные данные: температура стали и шлака, плотность стали и шлака, расход аргона на продувку, теплопроводность и теплоемкость стальковша, геометрия стальковша.

Таким образом, физические модели имеют существенный недостаток, так как основывается на характеристиках металла, которые не могут быть

оперативно измерены в процессе цикла плавки и жестко привязаны к конкретной конструкции стальковша и сложным физическим уравнениям. Применение же подходов машинного обучения позволяет учитывать гораздо большее число факторов.

По всему циклу плавки существует множество участков, где возможна оптимизация. В процессе заказа температуры сталевар на агрегате печь-ковш должен нагревать металл до требуемой температуры, причем с точностью порядка 5°C . Процесс нагрева металла также сложен, на температуру оказывают влияние десятки различных факторов. Задача прогнозирования температуры в стальковше с применением нейронных сетей рассматривается в работе [13]. Авторы отмечают высокую точность полученной нейросетевой модели. Из данных, использованных для валидации нейросетевой модели, ошибка в 69.24% случаев была ниже 4°C , и только в 9.22% случаев превышала 10°C . На рисунке 3 представлены результаты проверки качества модели.

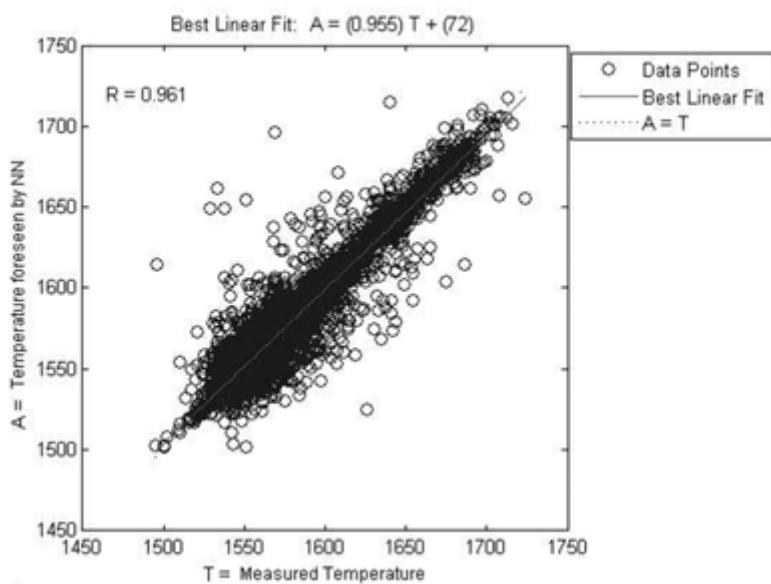


Рисунок 3 – Проверка качества нейросетевой модели

С помощью данной модели достигнут экономический эффект в 125 000\$ в год (снижение перегревов на агрегате печь-ковш в среднем на 4°C), что соответствует 4.5% годовых расходов на электроэнергию на агрегате. Отмечается, что преимущество подхода нейронной сети состоит в том, что он предо-

ставляет возможность моделирования системы без необходимости глубокого знания рассматриваемого процесса.

Описание решения аналогичной задачи с применением алгоритма random forest, AdaBoost.Rt и pruned bagging приводится в [14]. Помимо описания решения задачи методами машинного обучения, в статье приводится вариант с решением уравнений теплового баланса стальковша. Автор отмечает следующие значимые факторы:

1. Масса жидкой стали.
2. Номер стальковша.
3. Состояние стальковша (стойкость).
4. Температура пустого стальковша.
5. Начальная температура стали перед обработкой на УПК.
6. Время обработки на УПК.
7. Мощность электрической дуги.
8. Расход сыпучих.
9. Время и интенсивность продувки аргоном.

На рисунке 4 приводится иллюстрация из статьи, показывающая значение RMSE и максимальной ошибки прогнозов на тестовой и обучающей выборках.

Temperature model	Training		Testing	
	RMSE	Maximum error	RMSE	Maximum error
Random forest	2.3	8.9	2.8	7.6
Modified AdaBoost.RT	3.4	15.1	3.7	11.2
Pruned Bagging	4.2	17.9	4.3	13.7

Рисунок 4 – Точность методов Random forest, AdaBoost.Rt и Pruned Bagging

Таким образом, применение различных методов моделирования дает высокую точность в задаче прогнозирования температуры на УПК. Построение аналогичной модели в рамках данной работы может помочь точнее попадать в температуру отдачи стали с печь-ковшем.

1.3 Постановка задачи. Цели работы, критерии оценки и ограничения

1.3.1 Постановка задачи

Цель данного проекта заключается в построении математической модели падения температуры на участке производства УПК-УНРС на основе фактических данных о работе данного участка и разработке сервиса заказа температуры для применения модели в производстве на рабочих местах операторов разливки, сталеваров и начальников участка.

Задачи, поставленные перед выполнением работы:

1. Изучить научную литературу по теме работы.
2. Рассмотреть имеющиеся решения задачи.
3. Разработать собственную модель падения температуры стали.
4. Реализовать информационную систему для применения полученной модели в условиях производства.
5. Провести тестирование разработанной системы, представить интерпретацию результатов.

Основными функциями системы являются:

1. Получение исходных данных по плавкам из внешних систем.
2. Построение прогноза падения температуры, выдача рекомендации для заказа температуры оператору.
3. Построение отчетов о работе участка производства.
4. Архивирование данных работы модели для последующей аналитики и переобучения.

1.3.2 Критерии оценки системы

Основными критериями оценки при построении системы являются:

- возможность работы математических моделей в момент, когда требуется получить прогноз;
- достоверность результатов работы модели;
- достоверность отчетов о работе участка производства;
- минимальное время простоев системы

1.3.3 Основные ограничения

Основным ограничением при работе системы является качество прогнозов падения температуры. Так, допустимое отклонение от фактических величин изменения температуры стали равняется $7^{\circ}C$. Для отдельных сортаментных групп металла допускается и большее отклонение (до $10^{\circ}C$). Отклонение более $15^{\circ}C$ является признаком грубой ошибки прогнозирования падения температуры. Также к ограничениям относится неполнота данных о плавке в момент заказа температуры, а также запаздывание поступления информации из внешних систем.

2 Изучение и моделирование предметной области

2.1 Выявление основных понятий и процессов

2.1.1 Сталеразливочный ковш

Весь цикл внепечной обработки стали производится в одной и той же ёмкости – в сталеразливочном ковше, поэтому его характеристики могут оказывать существенное влияние на температуру стали. Ковшовая обработка стали представляет заключительную часть технологического процесса, целью которого является доведение до требуемых конечных значений основных параметров сталеплавильного процесса – химического состава стали, ее температуры, а также обеспечение однородности (гомогенности) металла по указанным параметрам. На рисунке 5 приводится типовая схема футеровки сталеразливочного ковша. Схема футеровки ковша может быть изменена в зависимости от конкретных условий его эксплуатации и требований к его вместимости [15].

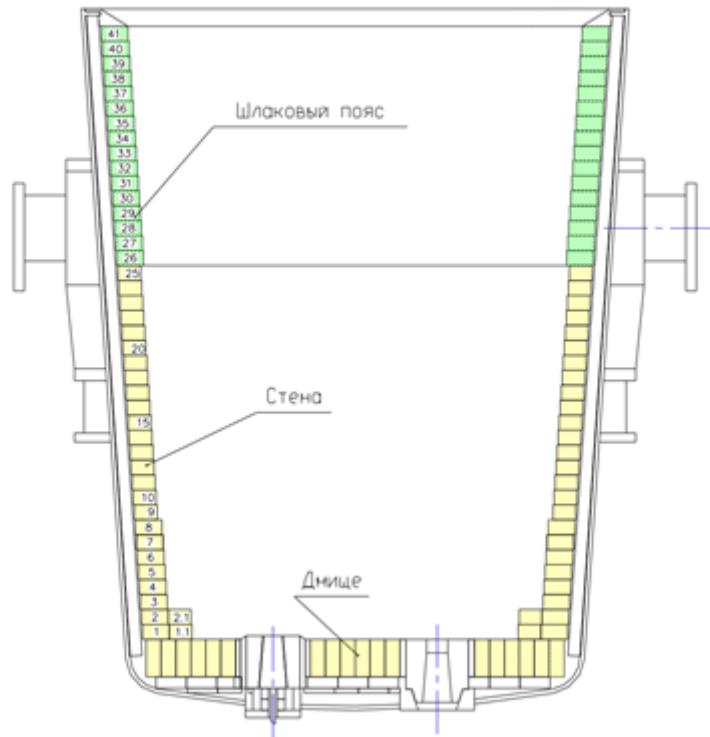


Рисунок 5 – Типовая схема футеровки сталеразливочного ковша

Футеровка защищает несущую конструкцию сталеразливочного ковша от теплового и химического воздействия жидкой стали. Условия эксплуатации сталеразливочных ковшей определяются маркой производимой стали и температурными режимами. Во время выпуска стали из конвертера в ковш последний подвергается резкому изменению температуры. Интенсивность воздействия всех разрушающих факторов определяется температурой металла, сливающегося в сталеразливочный ковш. В зависимости от технологических факторов, температура сливающегося в сталеразливочный ковш металла может составлять от 1530 до 1700 градусов [16].

Различные участки сталеразливочного ковша выполняются по разным технологиям, так как износ этих участков неравномерный. Наибольший износ отмечается в стеновых изделиях над продувочными пробками, в шлаковом поясе и в зоне ударного воздействия струи металла при его сливе из конвертера. Износ стеновых оgneупорных изделий, находящихся в зоне металла и на периферийных участках днища, незначителен [17].

Сами футеровки могут быть выполнены из специальных видов бетона или кирпича. Схемы футеровок разрабатываются исходя из условий эксплуатации ковшей и стоимости оgneупорных материалов. Различные типы футеровок также влияют и на снижение температуры стали в ковше во время ее обработки. В [18] указано, что основным преимуществом наливных футеровок принято считать высокую степень автоматизации процесса их изготовления с последующей подготовкой ковшей к эксплуатации, а также возможность периодического ремонта футеровки путем ее подливки после каждого 40...70 плавок. В процессе эксплуатации не допускается охлаждение футеровки ковша ниже 800°C из-за возможности ее разрушения, поэтому при длительном простое ковш подогревают [19]. В [20] приводится анализ снижения температуры стали в сталеразливочном ковше в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя между агрегатами печь-ковш и УНРС.

Исходя из приведенных в таблице 3 данных следует, что конкретный сталеразливочный ковш определенной схемы и стойкости футеровки может существенно влиять на температуру стали в промежуточном ковше УНРС, что должно быть учтено при разработке математической модели.

Таблица 3 – Анализ снижения температуры стали в ковшах

№ П/П	Количество плавок	Толщина теплоизоляционного слоя, у.е.	Снижение температуры стали, °C
1	44	0	н.д
2	40	8	4.9
3	43	8	5.0
4	42	15	4.9
5	43	15	6.0

2.1.2 УПК

Нагрев металла перед отправкой на разливку осуществляется на УПК. УПК в контексте данной работы является одним из основных агрегатов и выполняет следующие функции:

- подогрев металла до требуемой температуры на УНРС;
- раскисление;
- рафинирование от неметаллических примесей;
- доводка металла до целевых показателей химического состава с соответствующим уровнем десульфации;
- микролегирование и модифицирование неметаллических примесей;
- своевременное обеспечение УНРС металлом для разливки.

Последовательность проводимых операций на установке УПК определена регламентами цеха и особенностями физико-химических процессов. Энергия, расходуемая на нагрев в установке УПК, помимо полезного нагрева стали расходуется и на нежелательный нагрев крышки сталеразливочного

ковша, нагрев выходящих газов и т. д. Структура расходов энергии приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Структура теплового баланса установки печь-ковш

Статья затрат	Доля от общего расхода подаваемой мощности, %
Нагрев металла	33,93
Нагрев шлакообразующих	10,77
Нагрев ферросплавов	1,56
Потери с охлаждающей водой (крышка)	28,55
Потери с отходящими газами	3,71
Потери на нагрев ковша	4,48
Потери на резисторное сопротивление трансформатора и короткой цепи	16,0
Нагрев порошкообразной проволоки	1,0
Итого	100

Из всех приведенных в таблице 4 статей расхода энергии полезными являются нагрев металла, шлакообразующих, ферросплавов и порошковой проволоки. Таким образом, суммарный коэффициент полезного действия установки печь-ковш достигает 47% в зависимости от конкретных условий плавки и параметров ковша, состава ферросплавов [21].

Повышение коэффициента полезного действия возможно путем снижения затрат тепла на нагрев ковша. Для повышения начальной температуры ковша перед очередным циклом плавки применяется разогрев высокотемпературными газовыми горелками. Также на величину нагрева оказывает влияние и целевая температура металла на УНРС, задержка (выдержка) разливки. В случае возникновения нештатной ситуации плавка с высокой долей вероятности не будет разлита на УНРС, а направится на повторный подогрев на печь-ковш.

Схематично установка печь-ковш приведена на рисунке 6 [22].

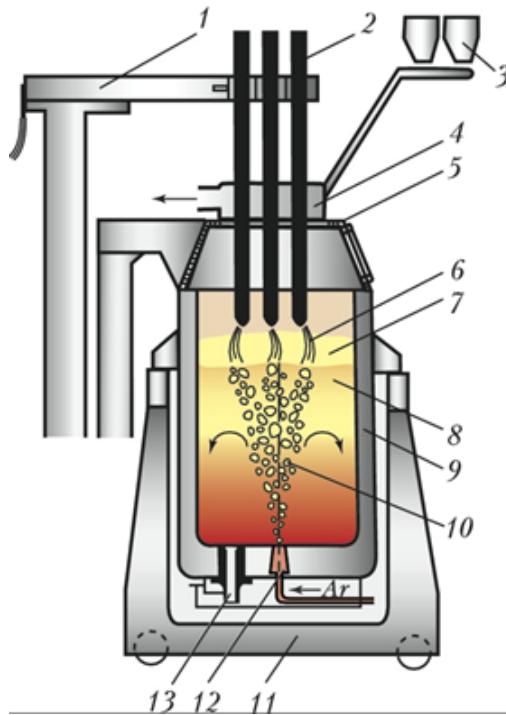


Рисунок 6 – Установка печь-ковш

Здесь цифрами обозначены:

1. Токоподвод.
2. Графитированные электроды.
3. Бункеры для ферросплавов.
4. Система удаления технологических газов.
5. Водоохлаждаемая крышка.
6. Электрические дуги.
7. Рафинировочный шлак.
8. Жидкий металл.
9. Футерованный ковш.
10. Газовая продувка.
11. Сталевоз.
12. Продувочное устройство.
13. Выпускное отверстие с шиберным затвором.

Включение в технологическую цепочку установки печь-ковш может быть выполнено по одному из следующих сценариев:

1. Конвертер — УДМ (предварительная обработка) — УПК (основная обработка) — УНРС.
2. Конвертер — УПК — УНРС.
3. Конвертер — УПК — вакууматор — УНРС.

При построении математической модели будет рассмотрен сценарий №1 и №2, так как падение температуры на УДМ или вакууматоре внесет дополнительное множество переменных в модель. Кроме того, падение температуры на таких маршрутах имеет сложную физико-химическую природу.

2.1.3 УДМ

Помимо установки печь-ковш, металл может быть обработан на установке доводки металла (УДМ), принципиально отличающейся отсутствием нагревательных электродов [23]. Устройство УДМ приведено на рисунке 7.

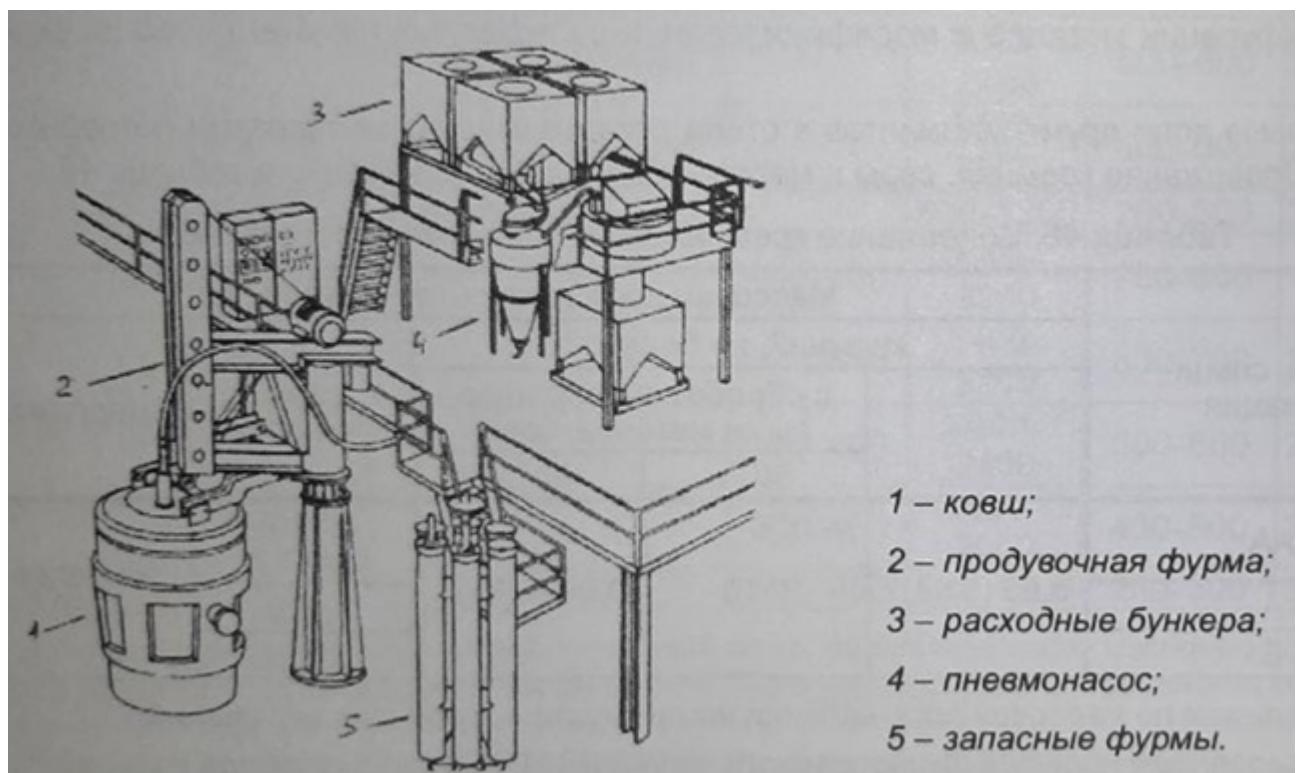


Рисунок 7 – Установка доводки металла (УДМ)

УДМ может выполнять следующие технологические операции:

- продувку металла инертными газами;
- корректировку химического состава и легирования металла;

- охлаждение металла или химический подогрев при помощи ввода алюминия и кислорода;
- модификация металла.

Как видно из рассмотренных выше функций, УДМ и печь-ковш могут влиять на химический состав и температуру как шлака, так и металла. Применение в технологической цепочке только лишь УДМ в большинстве случаев бывает невозможным, так как в таком случае во время всего цикла плавки происходит охлаждение металла.

Основные недостатки при обработке на УДМ:

- регулирование температуры путем химического подогрева и ввода в горячий металл сляба зачастую не дают требуемого технологического результата и нестабильны;
- длительная продувка аргоном экономически очень затратно;
- охлаждение металла влечет за собой увеличение цикла плавки, увеличение кранового времени;
- химический подогрев подразумевает ввод дополнительного алюминия или кремния. Сжигание этих элементов путём продувки кислородом приводит к повышению концентрации тугоплавких неметаллических включений на основе оксида алюминия. Данные примеси осложняют разливку металла на УНРС.

Применение в технологической цепочке только лишь УДМ в большинстве случаев бывает невозможным, так как в таком случае во время всего цикла плавки происходит охлаждение металла. Для соблюдение требуемой температуры на УНРС и облегчения прочих технологических операций температура выпуска на конвертере должна составлять 1700 градусов и выше. Такое повышение температуры значительно усиливает разрушение футеровки сталеразливочного ковша. Кроме того, в цепочке без агрегата печь-ковш придётся строго соблюдать временные ограничения. Качество шлака при таком сценарии также сильно снижается, а возможности его корректировки шлакообразующими присадками отсутствуют.

В дополнение ко всем операциям, которые могут проведены на УДМ, УПК обеспечивает возможность разогрева металла до 35-45 минут со скоростью до 4-5 градусов в минуту, что дает возможность расплавлять требуемое количество дешевых твердых шлаковых смесей для десульфации металла [24]. Также УПК позволяет гибко подстраиваться под темп работы УНРС и, тем самым, значительно снижать цикл плавки. Кроме того, применение УПК позволяет подогревать металл в случае аварийных ситуаций, когда выдержка металла между УПК и УНРС становится слишком большой.

Недостатки применения УПК:

- повышение требований к огнеупорным материалам для футеровки сталеразливочных ковшей;
- небольшое повышение содержания углерода в металле от разрушающихся электродов;
- повышение концентрации водорода и азота из-за дугового нагрева стали.

2.1.4 УНРС

Последним агрегатом в производственной цепочке конвертерного цеха является УНРС. На выходе таких установок получают слябы. Как правило, УНРС разделяют на вертикальные и криволинейные. Криволинейные установки получили большее распространение благодаря повышенной производительности и относительно небольшой высоты. Изгиб зоны вторично-го охлаждения прежде всего уменьшает общую высоту УНРС. Радиус дуги обычно равен 30-40 толщинам отливаемого сляба. В конце радиального участка заготовка проходит через тянувшие ролики в горизонтальное положение, после чего нарезается на слябы различной длины. УНРС радиально-го типа прежде всего позволяют значительно повысить скорость разливки за счёт большего сечения благодаря удалённости зоны резки от кристаллизатора. Высокая скорость разливки также обеспечивает более низкие требования к минимально допустимой температуре жидкой стали в промковше, что по-

ложительно влияет на экономические показатели цеха. Общая высота подобных установок достигает 12 метров. [25].

На рисунке 8 приведена схема УНРС различных конструкций. На иллюстрации обозначены: 1 – стальковш; 2 – крюк литьевого крана; 3 – промковш; 4- кристаллизатор; 5 – зона вторичного охлаждения; 6 – тянувшая клеть; 7- газорезка; 8 – поворотная корзина, 9 – рольганг; 10,11 – изгибающая и правильная машина. Приведенные на иллюстрации конструкции отличаются лишь изгибом зоны охлаждения.

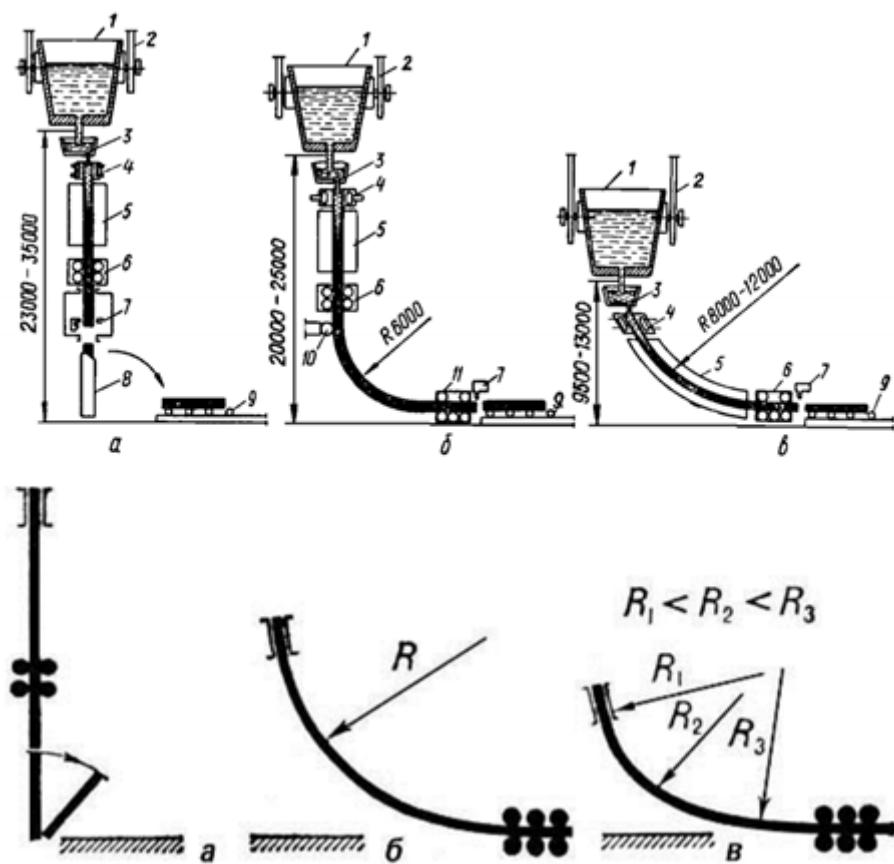


Рисунок 8 – Технологические схемы конструкции УНРС вертикального (а), радиального (б) и криволинейного (в) типов.

Одним из самых важных показателей, обеспечивающим получение качественных слябов, является температура металла в промковше. Низкая температура может привести к застыванию стали и остановке разливки. Если же температура превышает требуемую, то возможен прорыв затвердевшей поверхности стали в зоне искривления и выливание жидкого металла. Также, как и сталеразливочный ковш, промковш имеет футеровку определенной

стойкости. Иногда в промковше устанавливают различные перегородки для устранения расплескивания стали и противоударные устройства в зоне выливания металла из стальковша для предотвращения интенсивного размывания футеровки [26]. В [27] уделяется особенное внимание значительного повышения температуры отдачи с УПК при разливке стали на новом промковше. Также на увеличение температуры влияет и малое сечение разливаемых заготовок, так как при этом общая длительность разливки увеличивается.

Таким образом, скорость разливки, состояние промежуточного ковша и его конструкция должны быть учтены при построении математической модели. Перечисленные показатели наряду с выдержками металла между агрегатами и его химическим составом прямым образом влияют на требования к температуре стали в момент начала разливки на УНРС.

2.2 Теоретическое изучение предметной области

Исходными данными для построения модели являются исторические данные, содержащие паспорта плавок. База данных для обучения была выгружена из Системы слежения за металлом на ПАО НЛМК. Всего выгрузка содержит более 350 столбцов в csv-таблице. Краткий перечень параметров приведен в таблице 5. Для удобства названия параметров были переведены на английский язык.

Таблица 5 – Параметры и их описание

Название параметра	Перевод	Тип
Время до ВПО, мин	wait_vpo	number
Время разогрева стальковша	ldl_heat_time	number
Замена оgneупоров	swap_fireproof	number
Конв. Время начала разливки	konverter_start	datetime
Конв. Время окончания обработки	konverter_end	datetime

Продолжение таблицы 5

Название параметра	Перевод	Тип
Конв. Время продувки	konverte_blow_time	number
Конв. Время продувки верхнее	konverter_purge_hi_time	number
Конв. Время продувки нижнее	konverter_purge_low_time	number
Конв. Длительность выпуска	konverter_release_time	number
Конв. Номер установки	konverter_number	number
Конв. Окисленность	oxy_value	number
Конв. Температура выпуска	konverter_tapping_temp	number
Маршрут внепечной обработки	treatment_route	number
Межплавочный простой стальковша	ldl_idle_time	number
Номер плавки	heat_no	number
Номер промковша	tundish_no	number
Номер стальковша	ldl_no	number
УНРС. № плавки в серии	heat_in_cast	number
№ УНРС	unrs_number	number
УНРС. Начало разливки	unrs_begin	datetime
УНРС. Конец разливки	unrs_end	datetime
УНРС. Выдержка металла в стальковше конвертер-УНРС,мин	konverter_wait	number
УНРС. Выдержка металла в стальковше УДМ (УПК) - УНРС, мин	wait_udm_upk_unrs	number

Продолжение таблицы 5

Название параметра	Перевод	Тип
УНРС. Выдержка металла в стальковше УДМ-УНРС, мин	wait_udm_unrs	number
УНРС. Длительность разливки, мин	unrs_duration	number
УНРС. Марка стали	steel_model	str
УНРС. Планируемая скорость разливки на ручье 1	sched_cast_speed_str1	number
УНРС. Планируемая скорость разливки на ручье 2	sched_cast_speed_str2	number
УНРС. Последнее измерение t в промковше на УНРС	temperature_last	number
УНРС. Температура ТИ max	unrs_ti_max	number
УНРС. Температура ТИ min	unrs_ti_min	number
УНРС. Ширина сляба min	slab_width	number
Первая плавка на промковше	first_in_cas	number
Последняя плавка на промковше	last_in_cas	number
Сообщение	message	str
Стальковш после ремонта	after_repair	number
Количество плавок стальковша	ldl_dur	number
Температура Ликвидус	liquidus_temperature	number
УДМ. Время начала обработки	udm_begin	datetime

Окончание таблицы 5

Название параметра	Перевод	Тип
УДМ. Время окончания обработки	udm_end	datetime
УДМ. Окисленность	rs_udm_oxy_value	number
УПК. Время нагрева, мин	apk_heat_time	number
УПК. Время начала обработки	upk_begin	datetime
УПК. Время окончания обработки	upk_end	datetime
УПК. Время продувки верх фурм, мин	furm_hi_time	number
УПК. Время продувки донной фурм, мин	furm_low_time	number
УПК. Масса проволоки	upk_wire_total	number
УПК. Масса сыпучих	upk_mat_total	number
УПК. Номер установки	upk_number	number
УПК. Продолжительность обработки, мин	upk_duration	number
УПК. Расход аргона	upk_ar_total	number
УПК. Расход электроэнергии суммарный, МВт*ч	upk_power_total	number
УПК. Температура замер последний	upk_temperature_last	number
УПК. Температура ТИ max	upk_ti_max	number
УПК. Температура ТИ min	upk_ti_min	number

В дополнение к вышеприведенным данным также имеется информация о целевом содержании каждого химического элемента и последних замеров химии на УПК. Выгруженные данные подлежат предварительной обработке:

1. Удаляются наблюдения с маршрутами, не соответствующими прямому маршруту УПК – УНРС.
2. Удаляются наблюдения с выдержкой металла на УПК – УНРС более 60 минут, так как это нештатные ситуации и информация о таких плавках может быть недостоверной.
3. Столбец «Сообщение» кроме прочей информации содержит данные о конструкции промежуточного ковша на УНРС. Данный параметр должен быть выделен в отдельный столбец путем парсинга сообщения.

Общий объем исходных данных в выгрузке составляет 46705 плавок.

Количество отфильтрованный наблюдений составляет 22 497. Итоговый размер данных составил 24226 наблюдений с 2018-06-11 по 2020-01-13. Фильтрация производилась при помощи библиотеки Pandas на языке Python.

2.3 Экспериментальное изучение предметной области

В качестве исходного ПО для проведения исследований в данной работе используется набор библиотек для языка Python. Python — скриптовый язык программирования, который имеет большое сообщество среди специалистов в области анализа данных и прикладной математики.

Для обработки табличных данных используется библиотека pandas. Данная библиотека позволяет загружать табличные данные из различных источников, эффективно их обрабатывать и сохранять во все популярные форматы (csv, xls и др.). Фильтрация данных в pandas-таблицах осуществляется при помощи библиотеки NumPy. Библиотека NumPy предоставляет общие математические и числовые операции в виде прескомпилированных, быстрых функций. NumPy предоставляет базовые методы для манипуляции с большими массивами и матрицами.

Построение модели будет проводиться при помощи библиотек lightgbm и sklearn для python. Для сравнения будут построены медианная и квантильные регрессионные модели. Также для проверки будут построены модели для различных УНРС, так как каждая из них имеет особенности по

скорости разливки стали и вместимости промежуточного ковша. Сравнение моделей будет производиться путем сравнения следующих показателей:

- MAE;
- RMSE;
- R^2 ;
- среднее и максимальное отклонение предсказанной температуры на УНРС от нижней границы ТИ в тестовой выборке;
- количество наблюдений, где предсказанная температура на УНРС ниже минимального значения по ТИ.

Последний параметр имеет большое значение, так как отклонение температуры вниз от нижней границы ТИ может повлечь за собой аварийную остановку разливки стали. Также для оценки качества модели будут построены гистограммы распределения отклонений предсказанных температур от нижней границы по ТИ на УНРС в сравнении с фактическими отклонениями. В качестве исходных данных использовались данные по 24 226 плавкам с 2018-06-11 по 2020-01-13. Из этих данных в качестве тестовых данных были взяты последние 1000 наблюдений с 2019-12-21 по 2020-01-13. Следует также отметить, что доли сортаментных групп распределены в исходных данных неравномерно, что может сказаться на точности построенных моделей для редких марок.

2.3.1 Квантильная регрессионная модель

Для построения квантильной регрессии необходимо установить значение переменной `model_type` равным '`procentile`'. Порядок квантили задается в параметре `alpha` для `lightgbm.LGBMRegressor`. Ошибка RMSE на обучающем множестве составила 5.1, на тестовом – 4.7. Из всех рекомендаций на тестовом множестве 2% могли бы привести к слишком низкой температуре в промковше. Среднее превышение минимальной температуры по ТИ в промковше составляет 11 °C на тестовой и обучающей выборках.

Результаты построения квантильной регрессионной модели приведены на рисунке 9. На иллюстрации приводится фрагмент логов программы.

```
C:\Users\tyurin_as2\AppData\Local\Programs\Python\Python37\python.exe D:/faaaaa/ZakazT/models.py
Загружено 46709 строк 112 столбцов плавки 1813568 - 20011116 из D:\faaaaa\ZakazT\data\sadim.parquet
Загружено 62881 строк, 8 колонок из D:\faaaaa\ZakazT\data\Маршруты 2018-01 по 2020-01.parquet
Осталось 46705 строк после объединения с D:\faaaaa\ZakazT\data\Маршруты 2018-01 по 2020-01.xlsx
Осталось 24226 строк после удаления артефактов 2018-06-11 по 2020-01-13
Обучающая/валидационная выборка 23226 плавок 2018-06-11 по 2019-12-21
Тестовая выборка 1000 плавок 2019-12-21 по 2020-01-13
Исключены признаки с пустыми значениями ['Конв. Время продувки']
Сохранены модели: ['model_median', 'model_low', 'model_high']
importances: ['НР. Ширина сляба min', 'НР. Выдержка металла в стальковше УДМ (УПК) - УНРС, мин', 'НР. Выде
cv: MAE = 3.9, RMSE = 5.1, R2 = 0.72
test: MAE = 3.6, RMSE = 4.7, R2 = 0.81
Проверка рекомендаций: рекомендация минус ТИ = 11 гр. (2% ниже ТИ), факт минус ТИ = 13 гр. (0% ниже ТИ)
```

Рисунок 9 – Построение квантильной регрессионной модели

2.3.2 Медианная регрессионная модель

Для построения квантильной регрессии необходимо установить значение переменной `model_type` равным '`median`'. Результаты построения модели приведены на рисунке 10.

```
C:\Users\tyurin_as2\AppData\Local\Programs\Python\Python37\python.exe D:/faaaaa/ZakazT/models.py
Загружено 46709 строк 112 столбцов плавки 1813568 - 20011116 из D:\faaaaa\ZakazT\data\sadim.parquet
Загружено 62881 строк, 8 колонок из D:\faaaaa\ZakazT\data\Маршруты 2018-01 по 2020-01.parquet
Осталось 46705 строк после объединения с D:\faaaaa\ZakazT\data\Маршруты 2018-01 по 2020-01.xlsx
Осталось 24226 строк после удаления артефактов 2018-06-11 по 2020-01-13
Обучающая/валидационная выборка 23226 плавок 2018-06-11 по 2019-12-21
Тестовая выборка 1000 плавок 2019-12-21 по 2020-01-13
Исключены признаки с пустыми значениями ['Конв. Время продувки']
Сохранены модели: ['model_median', 'model_low', 'model_high']
importances: ['НР. Ширина сляба min', 'НР. Выдержка металла в стальковше УДМ (УПК) - УНРС, мин', 'НР. Выдержка металла в
cv: MAE = 3.9, RMSE = 5.1, R2 = 0.72
test: MAE = 3.6, RMSE = 4.7, R2 = 0.81
Проверка рекомендаций: рекомендация минус ТИ = 10 гр. (2% ниже ТИ), факт минус ТИ = 13 гр. (0% ниже ТИ)
```

Рисунок 10 – Построение медианной регрессионной модели

Ошибка RMSE на обучающем множестве – 5.1, на тестовом – 4.7. Из всех рекомендаций на тестовом множестве 2% могли бы привести к слишком низкой температуре в промковше. Среднее превышение минимальной температуры по ТИ в промковше составляет 10°C на тестовой и 9.5°C обучающей выборках. Результат построения медианной модели для УНРС-4 приведен на рисунке 11. Аналогичным образом была построена модель для УНРС-6 (рисунок 12).

```
Осталось 24226 строк после удаления артефактов 2018-06-11 по 2020-01-13
Обучающая/валидационная выборка 11372 плавок 2018-06-11 по 2019-11-27
Тестовая выборка 1000 плавок 2019-11-27 по 2020-01-13
Исключены признаки с пустыми значениями ['Конв. Время продувки']
Сохранены модели: ['model_median', 'model_low', 'model_high']
importances: ['НР. Ширина сляба min', 'НР. Выдержка металла в стальковше УДМ (УПК) - УНРС, мин', 'НР. Выд
cv: MAE = 3.8, RMSE = 5.0, R2 = 0.69
test: MAE = 3.4, RMSE = 4.5, R2 = 0.83
Проверка рекомендаций: рекомендация минус ТИ = 10 гр. (2% ниже ТИ), факт минус ТИ = 11 гр. (0% ниже ТИ)
```

Рисунок 11 – Построение медианной регрессионной модели для УНРС-4

```
models ×
C:\Users\tyurin_as2\AppData\Local\Programs\Python\Python37\python.exe D:/faaaaa/ZakazT/models.py
Загружено 46709 строк 112 столбцов плавки 1813568 - 2001116 из D:\faaaaa\ZakazT\data\sadim.parquet
Загружено 62881 строк, 8 колонок из D:\faaaaa\ZakazT\data\Маршруты 2018-01 по 2020-01.parquet
Осталось 46705 строк после объединения с D:\faaaaa\ZakazT\data\Маршруты 2018-01 по 2020-01.xlsx
Осталось 24226 строк после удаления артефактов 2018-06-11 по 2020-01-13
Обучающая/валидационная выборка 6536 плавок 2018-06-11 по 2019-11-03
Тестовая выборка 1000 плавок 2019-11-03 по 2020-01-13
Исключены признаки с пустыми значениями ['Конв. Время продувки']
Сохранены модели: ['model_median', 'model_low', 'model_high']
importances: ['НР. Ширина сляба min', 'НР. Выдержка металла в стальковше УДМ (УПК) - УНРС, мин', 'Количество пл
cv: MAE = 4.2, RMSE = 5.4, R2 = 0.68
test: MAE = 4.0, RMSE = 5.1, R2 = 0.74
Проверка рекомендаций: рекомендация минус ТИ = 9 гр. (4% ниже ТИ), факт минус ТИ = 12 гр. (0% ниже ТИ)
```

Рисунок 12 – Построение медианной регрессионной модели для УНРС-6

С точки зрения библиотеки lightgbm медианная регрессия идентична квантильной с той лишь разницей, что параметр alpha = 0.50. Для всех приведенных вычислительных экспериментов количество итераций алгоритма обучения задается как n_estimators = 1000.

Время обучения модели при таком количестве итераций составляет 70-75 секунд. После обучения модели скрипт в автоматическом режиме создает графики для визуальной оценки ошибки и сравнения реальных данных по перегревам в промковше и теоретическим. Теоретические перегревы рассчитываются исходя из того, что известно реальное падение температуры на участке. После расчета оптимальной температуры отдачи с УПК, к полученному значению прибавляется реальное падение температуры жидкой стали. Таким образом, производится вычисление теоретической температуры в промковше в случае принятия рекомендации модели.

2.3.3 Анализ и интерпретация результатов экспериментов

Оценка полученных в результате вычислительных экспериментов моделей производилась на тестовом множестве. Для наглядного сравнения всех построенных моделей в таблице 6 приведены показатели MAE, RMSE, R^2 и среднее отклонение температуры от нижней границы ТИ в промковше.

Таблица 6 – Сравнение моделей

Модель	MAE	RMSE	R^2	среднее отклонение температуры от нижней границы ТИ в промковше
Квантильная	3.6	4.7	0.81	11
Медианная	3.6	4.7	0.81	10
Медианная для УНРС-4	3.4	4.5	0.83	11
Медианная для УНРС-6	4.0	5.1	0.74	9

Анализ приведенной таблицы показывает, что медианная и квантильная регрессии показывают идентичные результаты по показателям MAE, RMSE и R2. Однако, медианная регрессия лучше по показателю среднего отклонения температуры от нижней границы ТИ в промковше, поэтому сравним частные медианные модели. Медианная модель для УНРС-4 показывает результаты чуть хуже общей медианной модели. Модель для УНРС-6 имеет лучший результат по среднему отклонению и худший по количеству холодных плавок. Наличие холодных плавок объясняется погрешностью моделей и неравными долями представления сортаментных групп в обучающей выборке. Худшая по данному показателю модель дает 4% холодных плавок, что является приемлемым результатом. Также в наборе данных для обучения отсутствовали важные параметры, описывающие шлак. Шлак значительно влияет на теплопотери во время транспортировки стальковша от УПК до УНРС.

Ввод данного фактора в модель может значительно повысить качество моделей. Для применения на производства может быть использована общая или частные медианные модели, так как они имеют наилучшие результаты по среднему отклонению температуры. В фактических данных холодные плавки практически отсутствуют, так как оператор располагает оперативной информацией о качестве шлака.

Данные показатели отражены на рисунках 13-15.

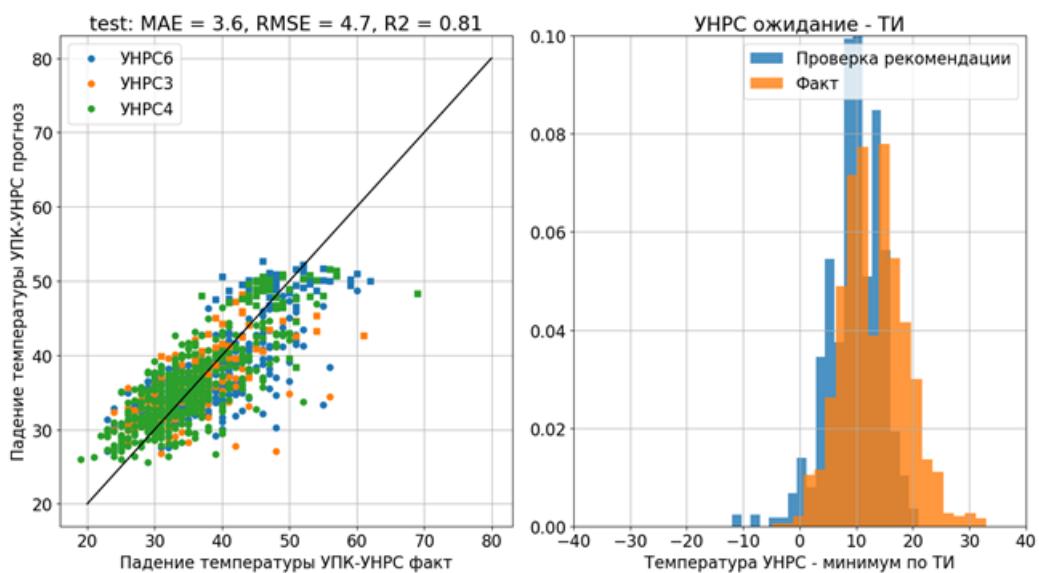


Рисунок 13 – Оценка качества медианной регрессионной модели

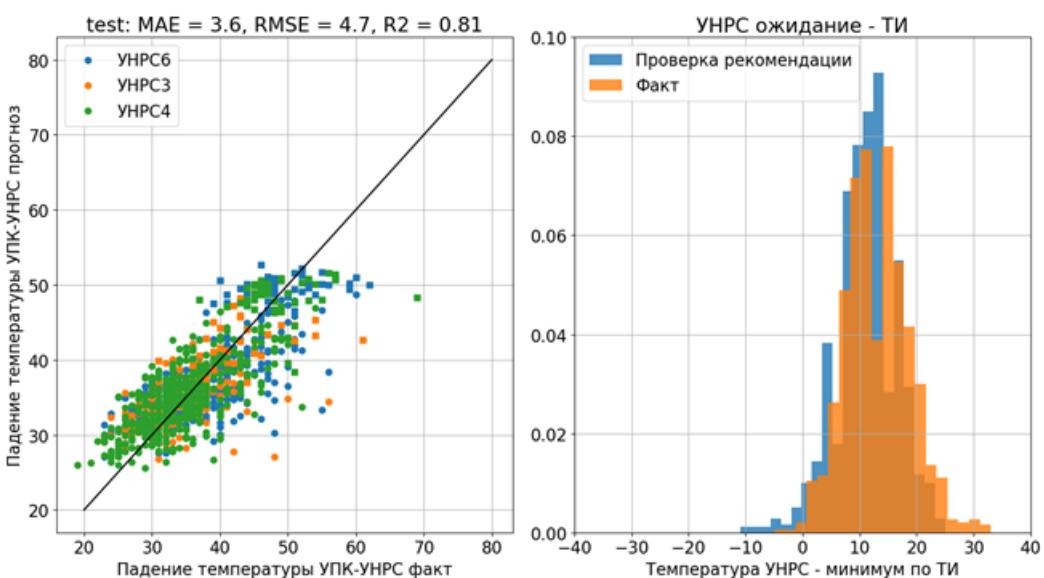


Рисунок 14 – Оценка качества квантильной регрессионной модели

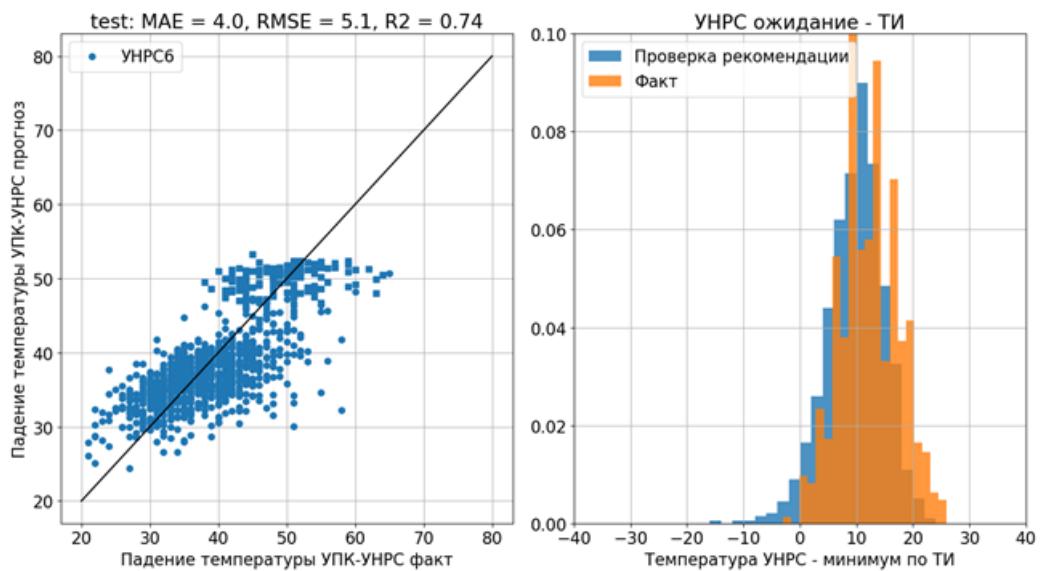


Рисунок 15 – Оценка качества медианной регрессионной модели для УНРС-6

Таким образом, построенные математические модели превосходят человека на 3 градуса по показателю среднего отклонения температуры от нижней границы ТИ в промковше, что может принести экономический эффект.

3 Проектирование системы

3.1 Общая архитектура системы

При разработке информационной системы была выбрана микросервисная архитектура. На рисунке 16 приведена концептуальная схема системы.

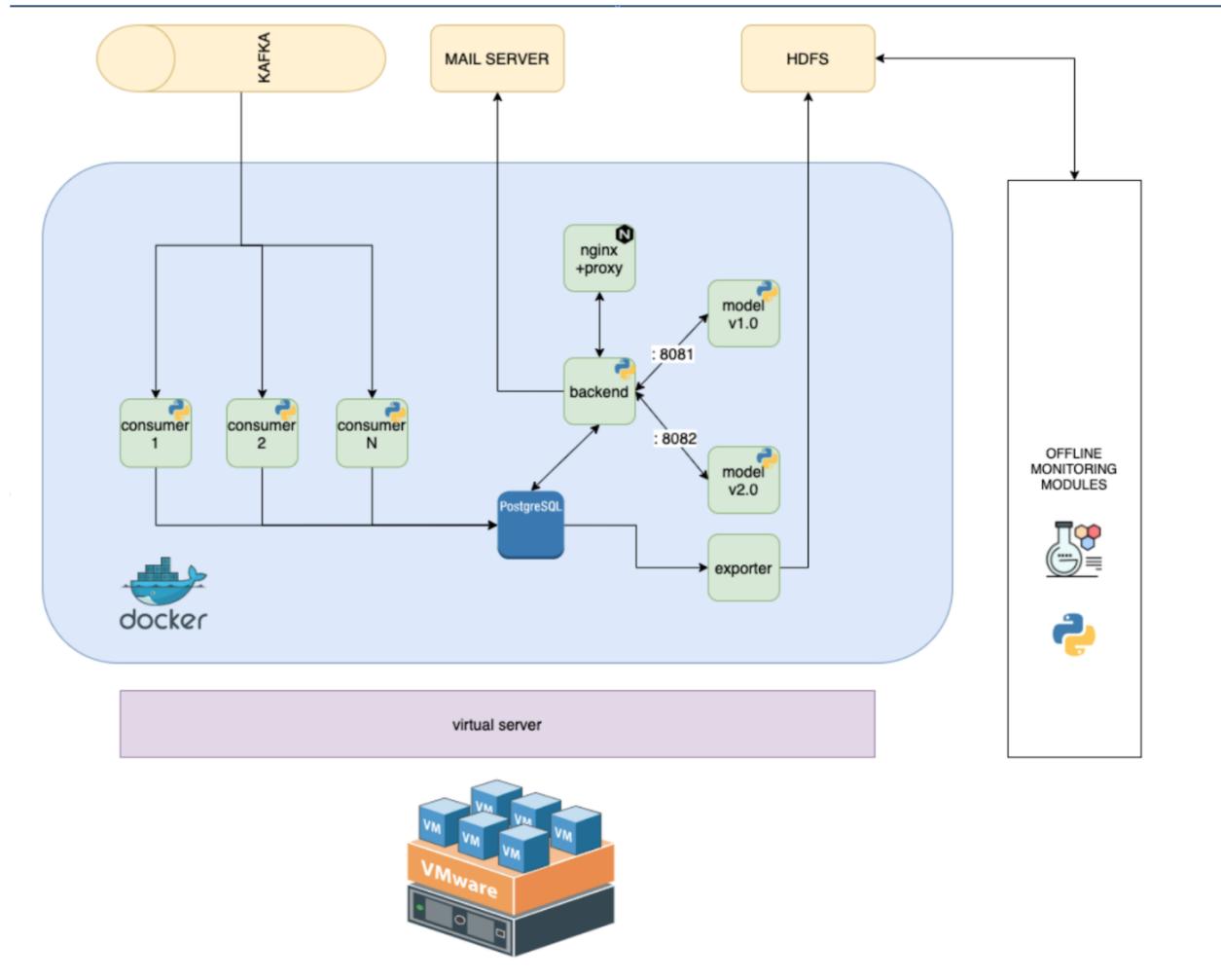


Рисунок 16 – Концептуальная схема системы

Для приема данных из системы Kafka созданы отдельные модули – консюмеры. Для каждого топика в Kafka создано отдельное приложение-контейнер, которое записывает все полученные данные в базу данных Postgres. Сама база данных также упакована в контейнер и является микросервисом. Для использования сразу нескольких версий математических моделей предполагается запуск каждой из них в отдельном микросервисе. В этом случае для каждой плавки будет получено несколько рекомендаций, каждая из которых будет

сохранена в базе данных. Разделение моделей подразумевается по номеру порта.

Раздачу статических файлов пользовательского интерфейса осуществляется nginx контейнер, который выполняет функцию проксирования запросов к backend контейнеру. Также на иллюстрации отражены внешние системы (Apache Kafka и почтовый сервер). Разработка всех микросервисов предполагается на языке python.

Так как сервер системы не предполагает накопления данных длительное время, то все логи системы и результаты работы моделей будут передаваться во внешнюю систему хранения данных посредством Kafka-топика. Архитектура системы разработана в соответствии с утвержденной на предприятии тиражируемой архитектурой продуктов. Тиражируемая схема архитектуры приведена на рисунке 17.

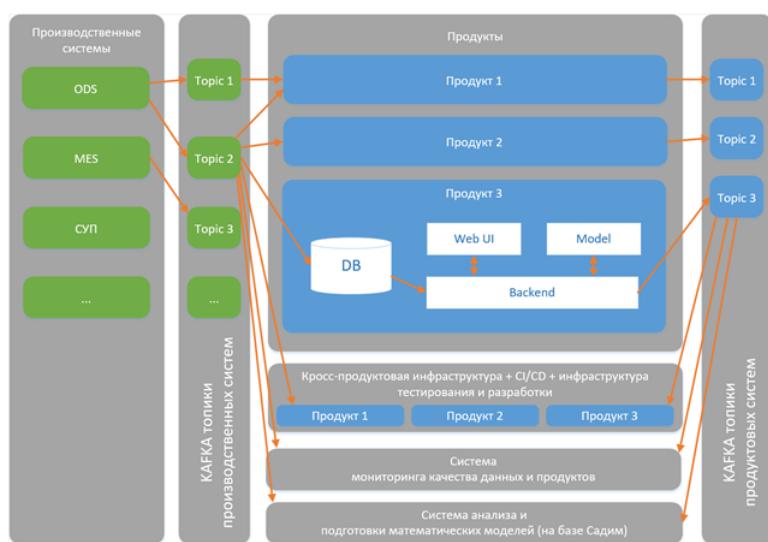


Рисунок 17 – Тиражируемая схема архитектуры продуктов

Применение микросервисной архитектуры позволяет обновлять части системы независимо и дает широкие возможности для горизонтального масштабирования отдельных нагруженных частей системы. В частности, в случае наличия более 1 раздела в топике Kafka возможен запуск нескольких консьюмеров для параллельного чтения данных.

3.2 Концептуальная и физическая модель данных

На рисунках 18 и 19 приведены концептуальная и физическая схемы данных соответственно. В таблицах 7 - 12 приведены спецификации существенных.

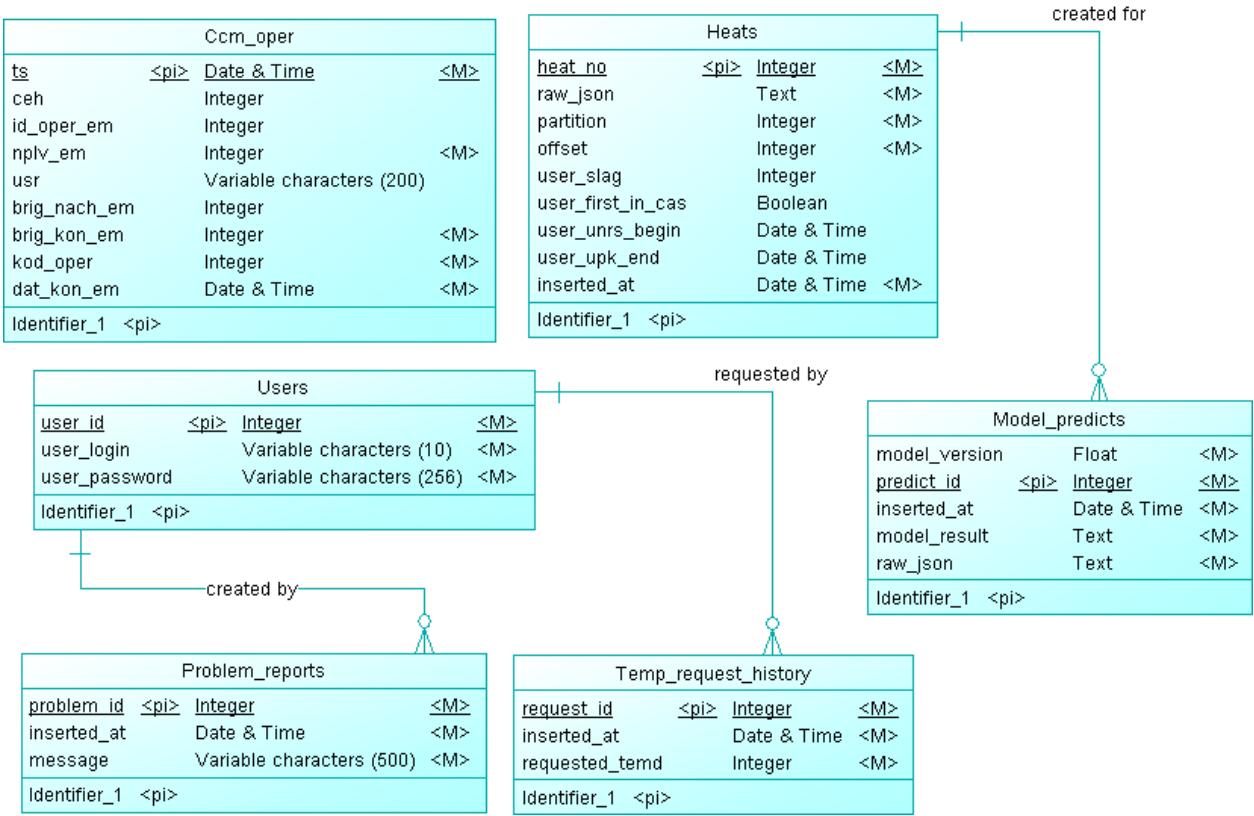


Рисунок 18 – Концептуальная схема данных

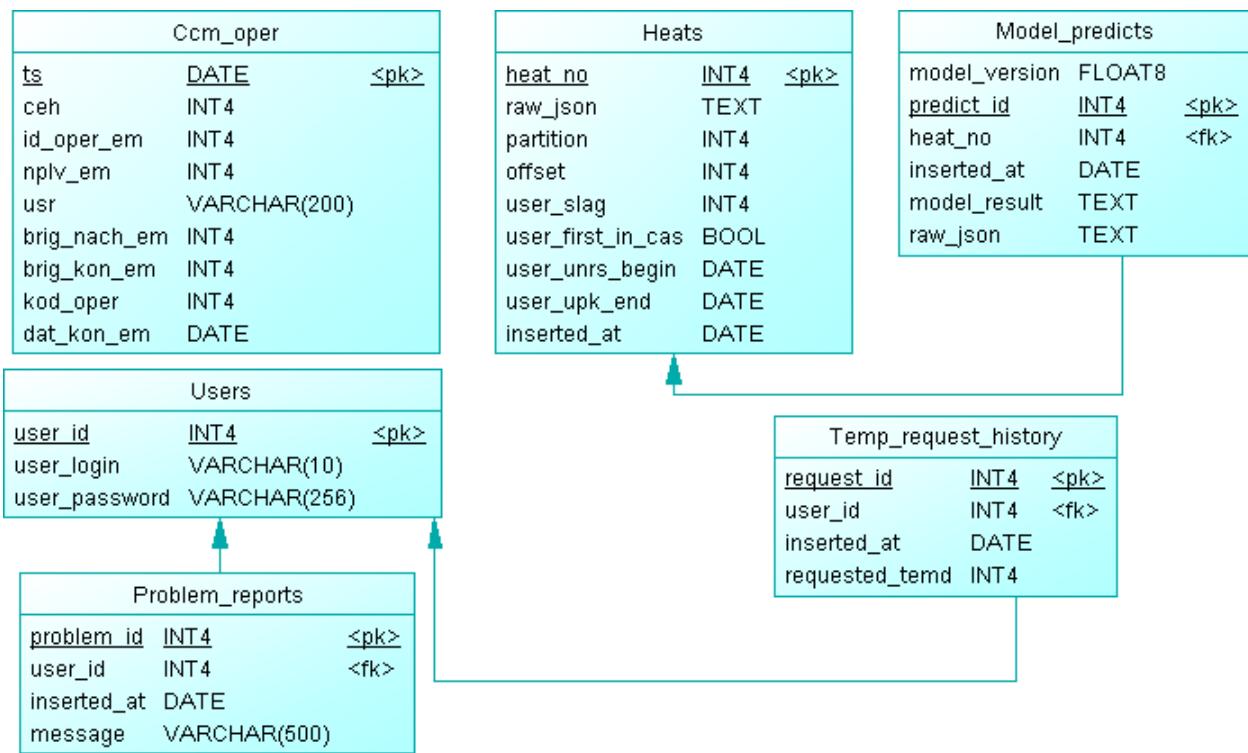


Рисунок 19 – Физическая схема данных

Таблица 7 – Спецификация сущности Ccm_oper

Название атрибута	Расшифровка	Тип
ts	время формирования сообщения в Kafka	Date & Time
ceh	номер цеха	Integer
id_oper_em	идентификатор операции	Integer
nplv_em	номер плавки	Integer
usr	пользователь операции	Variable characters (200)
brig_nach_em	бригада начала операции	Integer
brig_kon_em	бригада окончания операции	Integer
kod_oper	код операции (тип)	Integer
dat_kon_em	дата и время завершения операции	Date & Time

Таблица 8 – Спецификация сущности Heats

Название атрибута	Расшифровка	Тип
heat_no	номер плавки	Integer
raw_json	json в исходном виде	Integer
partition	номер partition в топике	Integer
offset	смещение внутри partition	Integer
user_slag	тип шлака	Integer
user_first_in_cas	первая плавка на промковшее	Boolean
user_unrs_begin	польз. время начала разливки	Date & Time
user_upk_end	польз. время отдачи с УПК	Date & Time
inserted_at	дата и время вставки записи	Date & Time

Таблица 9 – Спецификация сущности Model_predicts

Название атрибута	Расшифровка	Тип
heat_no	номер плавки	Integer
model_version	номер плавки	Integer
predict_id	идентификатор записи	Integer
inserted_at	дата и время вставки записи	Date & Time
model_result	результат работы модели в исходном виде	Text
raw_json	json в исходном виде	Text

Таблица 10 – Спецификация сущности Users

Название атрибута	Расшифровка	Тип
user_id	идентификатор пользователя	Integer
user_login	логин	Variable characters (10)
user_password	пароль	Variable characters (256)

Таблица 11 – Спецификация сущности Problem_reports

Название атрибута	Расшифровка	Тип
problem_id	идентификатор записи	Integer
inserted_at	дата и время вставки записи	Date & Time
message	описание проблемы	Variable characters (500)

Таблица 12 – Спецификация сущности Temp_request_history

Название атрибута	Расшифровка	Тип
request_id	идентификатор записи	Integer
inserted_at	дата и время вставки записи	Date & Time
requested_temp	заказанная температура	Integer

3.3 Макеты интерфейсов пользователя

На рисунках 20 - 21 приведены макеты пользовательского интерфейса. Для сталевара главное окно может отличаться по набору информации о плавке, так как для него не нужна вся представленная в макете информация.

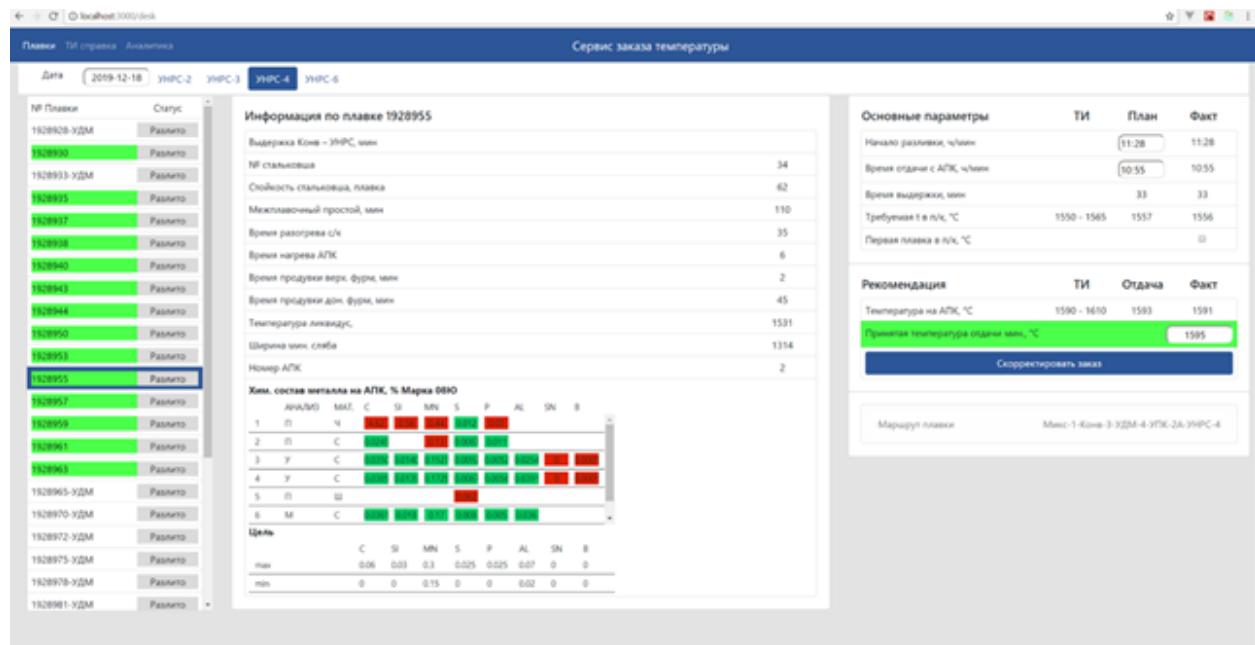


Рисунок 20 – Макет главного окна

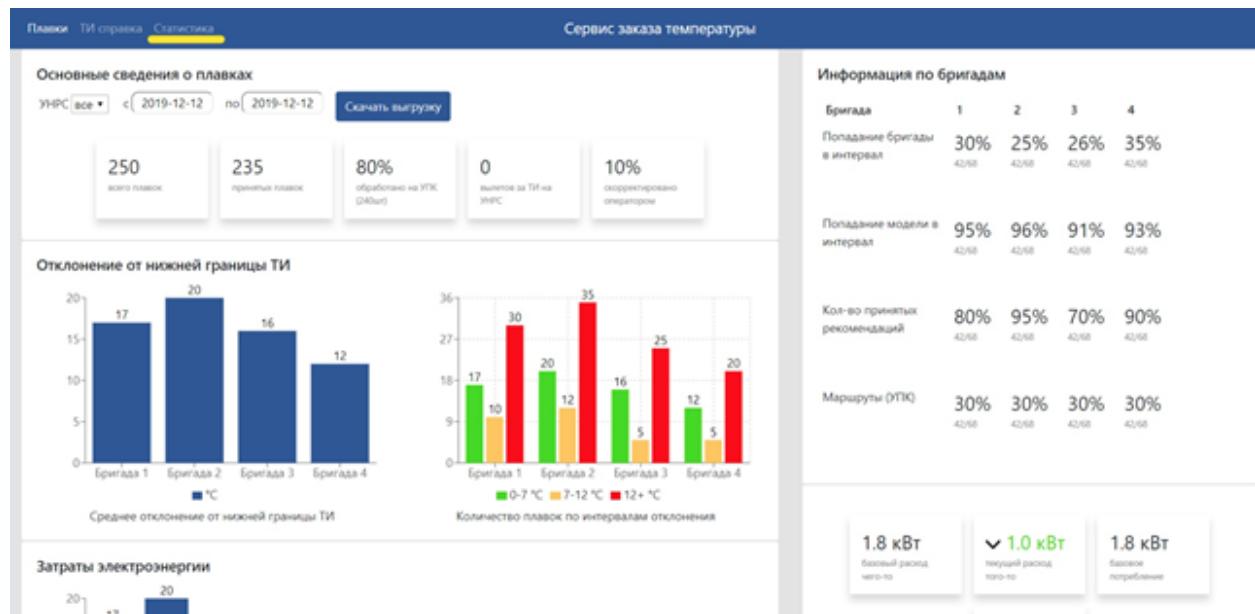


Рисунок 21 – Макет страницы аналитики

В случае, если прогноз модели и решение оператора будут отличаться более чем на 5 °C, то свое решение оператор должен будет прокомментировать в диалоговом окне. На странице аналитики будут отображены ос-

новные показатели работы бригад – общее количество плавок, случаи отклонения температуры стали от ТИ и т.д. По показателям среднего отклонения температуры от ТИ и отклонениям температуры выпуска стали с УПК будут показаны столбчатые диаграммы.

3.4 Формы отчетов

Для начальников участка производства предоставляется еженедельный отчет о работе бригад. Также на странице аналитики возможна выгрузка данных из системы в формате csv для дальнейшего анализа. Фрагменты такой выгрузки представлены на рисунках 22 -23.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
номер плавки	маршрут	марка стали	стойкость футеровки стальковша	№ стальковша	стальковш после ремонта	межплавоч ный простой	время разогрева с/к	время нагрева в АПК	АПК дон. продувка длит.	АПК верхн. продувка длит.	udm_fact
2007621	Микс-1-УДЧ СтЗсп	75.0	21	0	73.0	30.0					-1.0
2007623	Микс-1-УДЧ СтЗсп	50.0	28	0	112.0	30.0					-1.0
2007625	Микс-1-УДЧ СтЗсп	7.0	27	0	107.0	30.0					-1.0
2007626	Микс-1-Кон СтЗсп	45.0	9	0	97.0		16.0	88.0	0.0	0.0	
2007627	Микс-1-УДЧ СтЗсп	31.0	15	0	80.0						-1.0
2007628	Микс-1-Кон 08пс	52.0	24	0	112.0	45.0	24.0	100.0	0.0	0.0	1.0
2007629	Микс-1-УДЧ СтЗсп	42.0	5	0	51.0						-1.0
2007630	Микс-1-Кон СтЗсп	47.0	32	0	60.0		14.0	98.0	0.0	0.0	
2007631	Микс-1-УДЧ СтЗсп	64.0	26	0	662.0	435.0					-1.0
2007632	Микс-1-Кон 08пс	82.0	16	0	76.0		11.0	68.0	0.0	0.0	
2007633	Микс-1-УДЧ СтЗсп	76.0	21	0	77.0						
2007634	Микс-1-Кон 08пс	1.0	14	0	21736.0	50.0	19.0	79.0	1.0	0.0	

Рисунок 22 – Выгрузка данных из сервиса

A	B	C	D	E
	Бригада 1	Бригада 2	Бригада 3	Бригада 4
% принятых рекомендаций	60	78	90	80
% отклонений от ТИ более 10	20	15	2	4
% отклонений от ТИ менее 7	80	85	90	85
среднее сечение сляба	1200	1350	1400	1300
код-во вылетов ниже ТИ	1	0	0	0

Рисунок 23 – Пример еженедельной формы отчета для рассылки

4 Реализация системы

4.1 Аппаратное обеспечение

Аппаратное обеспечение для разрабатываемой системы предполагает аппаратную платформу для развертывания всех компонентов системы. Опытным путем были установлены следующие требования к аппаратной платформе:

- процессор - 8 ядер;
- оперативная память - 8 Gb;
- дисковое пространство для операционной системы и размещения контейнеров - 128 Gb SSD.

Также сервер должен иметь выход в сеть предприятия для взаимодействия с внешними системами. Сервер может быть виртуальной машиной, с установленной unix операционной системой.

4.2 Информационное обеспечение

Для обеспечения работы разрабатываемой системы необходима СУБД PostgreSQL версии 9 и выше. Для упрощения настройки и установки предполагается, что СУБД устанавливается в виде Docker-контейнера. Для администрирования СУБД используется система PgAdmin, которая также устанавливается в виде Docker-контейнера. Для работы PgAdmin контейнер должен быть размещен в одной Docker-сети с контейнером СУБД.

Обмен сообщениями с внешней системой Apache Kafka производится в формате json. Для определения очередности сообщений в Kafka-топике необходимо сохранять meta-данные сообщения - partition number и partition offset. Так как все сообщения по одной и той же плавке имеют одно название, то Kafka гарантирует передачу таких сообщений в одной partition и очередьность из доставки. Содержание самого сообщения имеет четко определенную структуру. Структура сообщения регламентируется json-схемой, установленной специалистами НЛМК. Если сообщение не соответствует схеме, то сервисы, работающие на данном Kafka-топике, прекращают свою работу.

Выгрузки сообщений о работе сервиса должны иметь формат parquet для их последующей обработки при помощи Apache Spark. Выгрузка данных должна производиться каждый час в папку, соответствующую одним суткам. Название папки задается в формате DDMMYYYY. Название каждого parquet-файла соответствует номеру плавки. В каждом parquet-файле должны присутствовать следующие поля:

- финальный слепок данных по плавке;
- слепок данных, использованный в момент выдачи рекомендации;
- результат работы модели;
- содержимое полей пользовательского ввода.

4.3 Программное обеспечение

Для разработки и развертывания системы в продуктивной среде на сервере должна быть установлена операционная система, поддерживающая Docker. Во время разработки использовалась Cent OS. Для установки Docker в производственной сети предприятия необходимо сконфигурировать менеджер пакетов для работы с корпоративным прокси-сервером.

Для настройки автоматической сборки контейнеров и их развертывания необходимо сконфигурировать Docker. Для скачивания образов с корпоративного Docker repository используются настройки registry-mirrors. Кроме того, для избежания ошибок маршрутизации сетевых пакетов необходимо указать в настройках Docker networks запрет на использование подсетей, совпадающих с подсетями предприятия. Для оркестрации контейнеров разрабатываемая система использует docker-composer, который также устанавливается на сервер при помощи менеджера пакетов.

Мониторинг сервера осуществляется посредством системы Telegraf. Сама система устанавливается при помощи менеджера пакетов и затем конфигурируется с помощью bash-скрипта. В скрипте указываются метрики, собираемые для мониторинга и периодичность их сбора.

4.4 Разработанные программные средства

Внутреннее устройство разработанной системы выполнено по микросервисной архитектуре. Каждый микросервис представляет собой отдельный проект, который функционирует в независимом Docker-контейнере. Сборка каждого из контейнеров также происходит независимо посредством инструментов CI/CD GitLab либо локально, на рабочем компьютере программиста. В этом случае доставка образов на сервер для развертывания осуществляется при помощи SFTP-клиента (например, бесплатной утилиты WinSCP).

4.4.1 Структура проекта

Согласно подходу микросервисной архитектуры проект разбит на ряд отдельных микросервисов. В данном случае проект представляет из себя набор отдельных репозиториев, так как это упрощает настройку CI/CD средствами GitLab. Проект состоит из следующих репозиториев:

- data-science - репозиторий для хранения исходных кодов для анализа данных. Предназначен исключительно для хранения jupyter файлов без данных, так как git не предназначен для хранения больших объемов данных. Все исходные данные хранятся в HDFS хранилище;
- data-collector - репозиторий для хранения и сборки микросервиса со-хранения результатов работы сервиса в HDFS хранилище ;
- model - репозиторий для хранения и сборки микросервисов моделей. Отдельная ветка в репозитории содержит в себе конкретную реализацию модели;
- zakaz-ui - репозиторий для хранения и сборки микросервиса с пользовательским интерфейсом + nginx сервером для проксирования запросов к API backend;
- zakaz-backend - репозиторий для хранения и сборки микросервиса с API backend;
- consumer - репозиторий для хранения и сборки микросервиса получения данных из Kafka-топиков. В данном репозитории есть несколько ве-ток, в каждой из которых размещен исходный код отдельного consumer

для конкретного Kafka-топика. В каждом репозитории, предназначенном для сборки микросервиса, есть ветка под названием `ci`, коммит в которую инициирует начало сборки Docker-образа для его последующего развертывания на сервере.

Сборка образов происходит при помощи выделенного в инфраструктуре цифровой платформы предприятия GitLab Runner. Для всей группы репозиториев данной системы выделен один GitLab Runner, который представляет из себя сконфигурированный для сборок Docker-контейнер на базе операционной системы `ubuntu`. Данный контейнер запускается только лишь на время сборки образа и не хранит своего состояния, из чего следует, что все необходимые файлы должны быть размещены в ветке `ci`. Настройка сборки кода осуществляется при помощи файла конфигурации `.gitlab-ci.yml`. Зависимости различных проектов скачиваются соответствующими менеджерами пакетов.

Так как GitLab Runner не хранит своего состояния, то все параметры подключения к хранилищу артефактов и прокси-серверам задаются для группы проектов в настройках Gitlab. На рисунке 24 приведены переменные для данной группы проектов.

Variables

Environment variables are applied to environments via the runner. They can be protected by only exposing them to protected branches or tags. Additionally, they can be masked so they are hidden in job logs, though they must match certain regexp requirements to do so. You can use environment variables for passwords, secret keys, or whatever you want. You may also add variables that are made available to the running application by prepending the variable key with `K8S_SECRET_`. [More information](#)

Environment variables are configured by your administrator to be protected by default					
Type	Key	Value	Protected	Masked	
Variable	ZAKAZT_DOCKER_REPO_PASS_RO	*****	x	✓	
Variable	ZAKAZT_DOCKER_REPO_PASS_RW	*****	x	✓	
Variable	ZAKAZT_DOCKER_REPO_PATH	*****	x	✗	
Variable	ZAKAZT_DOCKER_REPO_USER_RO	*****	x	✓	
Variable	ZAKAZT_DOCKER_REPO_USER_RW	*****	x	✓	

[Reveal values](#) [Add Variable](#)

Рисунок 24 – Результаты испытаний сервиса

Для корректного скачивания всех зависимостей в Runner настроены корпоративные прокси репозиториев python-пакетов (pypi), yarn, npm и многие другие. Помимо того, что Runner автоматизирует рутинные операции по сборке образа, он еще решает проблему настройки рабочего окружения программиста (установку и конфигурирование Docker необходимым образом).

4.4.2 Средства оркестрации контейнеров

Для удобного управления контейнерами применяются различные средства оркестрации контейнеров - docker-composer и portainer. Все микросервисы разрабатываемой системы, порядок их запуска, политики перезагрузки в случае остановки, окружение и распределение по docker-сетям описаны в docker-composer.yaml. Для управления параметрами окружения контейнеров используются env-файлы конфигурации. К параметрам окружения контейнеров относится все, что специфично для конкретной платформы и среды запуска - логины и пароли подключений, номера портов и т.д. Также в env-файл помещается информация о Docker-образах для развертывания. Данный файл может быть заполнен программистом вручную, либо может заполняться автоматически последним шагом сборки образа в GitLab Runner. Все файлы конфигурации и сам docker-composer.yaml не может храниться вместе с исходным кодом системы и размещается в отдельном закрытом репозитории, либо не версионируются вовсе.

Система portainer представляет из себя Docker-контейнер, который также позволяет оркестрировать контейнеры посредством удобного графического пользовательского интерфейса. Portainer позволяет управлять всеми настройками каждого контейнера, сетями и прочими составляющими Docker. К достоинствам этой системы стоит отнести возможность мониторинга потребления системных ресурсов контейнерами и удобное представление log-файлов.

4.4.3 Backend микросервис

В рамках системы реализован API получения данных для пользовательского интерфейса. API сервер реализован на фреймворке Flask. Для реализации механизма авторизации применяется библиотека flask jwt simple. Под-

ключение к базе данных реализовано посредством библиотеки psycopg2. Параметры подключения к базе данных задаются переменными окружения и не хранятся в коде. Подсчет статистики реализован при помощи библиотеки pandas.

Для работы с данными реализованы следующие методы:

- /login - метод авторизации;
- /analytics-detail - метод для получения детальной информации по завершенным плавкам для их анализа;
- /get-heat-list - метод для получения списка плавок;
- /get-by-heat - метод для получения детальной информации по плавке;
- /accept-heat - метод для сохранения заказанной температуры;
- /update-heat - метод для сохранения пользовательского ввода;
- /get-csv - метод, позволяющий скачивать выгрузку данных в формате csv;
- /analytics - метод для подсчета статистики;
- /predict - метод для получения рекомендации для заказа температуры.

4.4.4 Frontend микросервис

Пользовательский интерфейс реализован с использованием фреймворка React JS. Для организации хранения данных в приложении используется библиотека Redux. Для каждого запроса в backend API создается отдельный reducer. В структуре проекта создан отдельный функциональный модуль createHttpRequestReducer для создания reducer, в структуре которого присутствуют поля: request, data и error. Структура reducer позволяет отображать актуальное состояние запросов к серверу без усложнения кода цепочками вызовов then(). Сам же пользовательский интерфейс построен при помощи библиотеки React Bootstrap, стилизованной под корпоративный стиль.

Сборка frontend микросервиса происходит в несколько этапов (multi stage сборка), что позволяет минимизировать размер образа. Сборка средствами GitLab подразумевает только одну стадию в Dockerfile - сборку nginx контейнера, так как сборка самого React приложения осуществляется прямо

в GitLab Runner и кешируется, что многократно ускоряет сборку. Список всех стадий сборки микросервиса выглядит следующим образом:

- build_npm - сборка React JS приложения;
- build_docker - сборка образа;
- staging - запись имени образа в env файл для docker-composer и инициализация развертывания контейнеров на тестовом сервере;
- production - инициализация развертывания контейнеров на production-сервере.

Последние стадии развертывания запускаются вручную из интерфейса пользователя на странице GitLab.

5 Представление и анализ полученных результатов

Построенные математические модели позволяют снизить средний перегрев в промковше на УНРС в среднем на 3-4 °C. Результаты испытаний сервиса в течении нескольких месяцев приведены на рисунке 25.

месяц_сортамент	средняя t в промковше	Δ средняя t в промковше	доля, %
февраль_сп/пс	1547,185	0	41,933
май_сп/пс	1550,522	3,337	43,823
апрель_сп/пс	1545,748	-1,438	43,548
февраль_08Ю/08пс	1561,589	0	32,57
май_08Ю/08пс	1559,486	-2,103	45,193
апрель_08Ю/08пс	1560,246	-1,343	41,558
февраль_НЛ	1543,744	0	18,64
май_НЛ	1549,535	5,791	4,975
апрель_НЛ	1546,572	2,828	11,736
февраль_НКНС	1560,526	0	1,363
май_НКНС	1556,906	-3,62	3,636
апрель_НКНС	1552,333	-8,193	0,807
февраль_ЭАС/ЭИС	1521,812	0	1,125
май_ЭАС/ЭИС	1527,111	5,299	0,981
апрель_ЭАС/ЭИС	1523,923	2,111	0,881
февраль_01ЮТ	1571,5	0	0,661
май_01ЮТ	1572	0,5	0,584
апрель_01ЮТ	1575,818	4,318	0,678
февраль_other	1550,765	0	3,708
май_other	1550	-0,765	0,808
апрель_other	1561,167	10,402	0,792

Рисунок 25 – Результаты испытаний сервиса

В приведенной аналитике базовым результатом считается февраль, так как именно в этом месяце был получен положительный технологический и экономический эффект по сравнению с тем же периодом в 2019 году. В приведенной таблице видно, что снижение температуры в промковше достигнуто не на всех сортаментах. Данное обстоятельство может быть связано, прежде всего, с наличием непримитивных ситуаций, когда оператор УНРС вынужден заказывать температуру выше, чем требуется. Кроме того, сортамент НЛ (низколегированная сталь) занимает малую долю в общем объеме произведенного металла.

Дальнейшее повышение качества прогнозов может улучшить показатели технологического и экономического эффекта. Так как окончательное решение о заказе температуры принимает бригадир, то человеческий фактор также вносит корректировку в представленную статистику. Установлено, что

отдельные бригады заказывают температуру отдачи в среднем выше, чем все остальные. Каждая бригада имеет свой подход к работе с сервисом, но, как правило, минимальный средний перегрев в промковше имеет та бригада, которая соглашается с рекомендацией сервиса чаще других (80% принятых рекомендаций и более).

На рисунке 26 представлено сравнение теоретических перегревов в случае 100% доверия сервису и реальных.

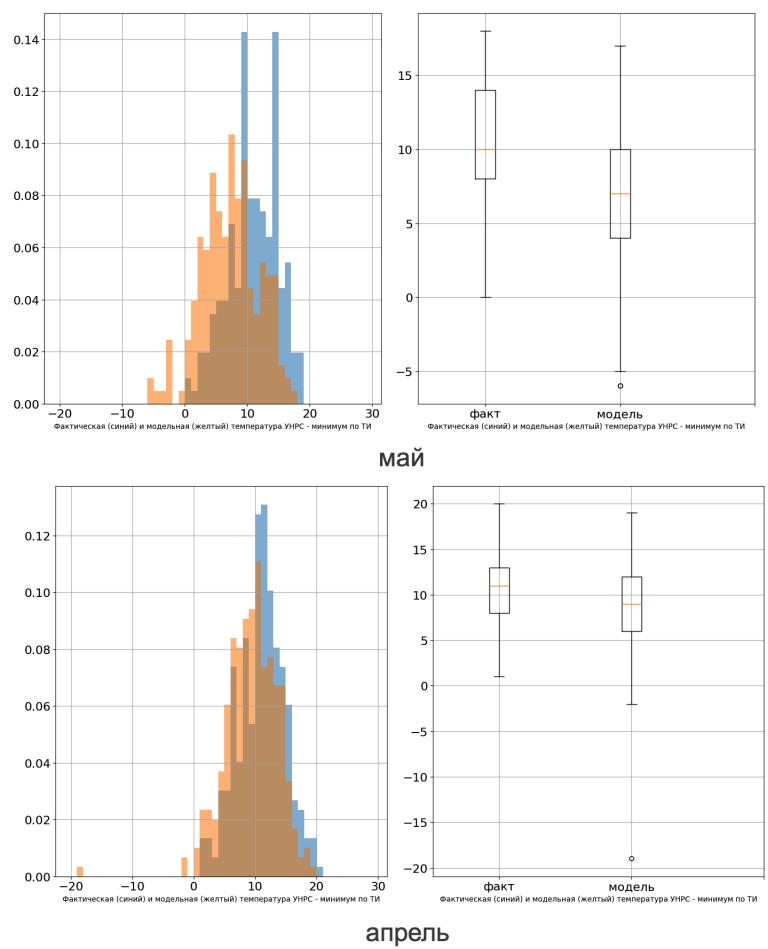


Рисунок 26 – Сравнение перегревов в промковше в мае 2020г.

Как видно на иллюстрациях, полное доверие модели может принести еще больший экономический эффект, но оператор разливки должен всегда распознавать заниженные рекомендации. В данный момент технологические инструкции по многим сортаментам составлены с большим запасом и занижение рекомендации не повлечет за собой аварийную ситуацию. Таким обра-

зом, разработанные математические модели способны уже сейчас принести значимый технологический и экономический эффект.

Кроме снижения энергозатрат на нагрев металла на УПК, разработанный сервис решает проблему коммуникации между рабочими на УПК и УНРС. Если же до использования сервиса заказанная температура фиксировалась в рукописном журнале, который не хранился более месяца, то сейчас все заказы сохраняются в локальной базе данных сервиса и архивируются во внешнем HDFS-хранилище. Внешний вид основной страницы сервиса представлен на рисунке 27.

Рисунок 27 – Главная страница сервиса

Разработанная аналитическая часть позволяет оценивать работу бригад и модели за выбранный период. В частности, очень важными показателями работы бригады считается "Среднее отклонение от нижней границы ТИ" и "Кол-во принятых рекомендаций". Последний показатель говорит о степени доверия бригадиров разливки к математической модели. Также начальник участка может просматривать информацию по плавкам, попавшим в аналитику, более детально.

На рисунке 28 представлен интерфейс аналитической части сервиса.

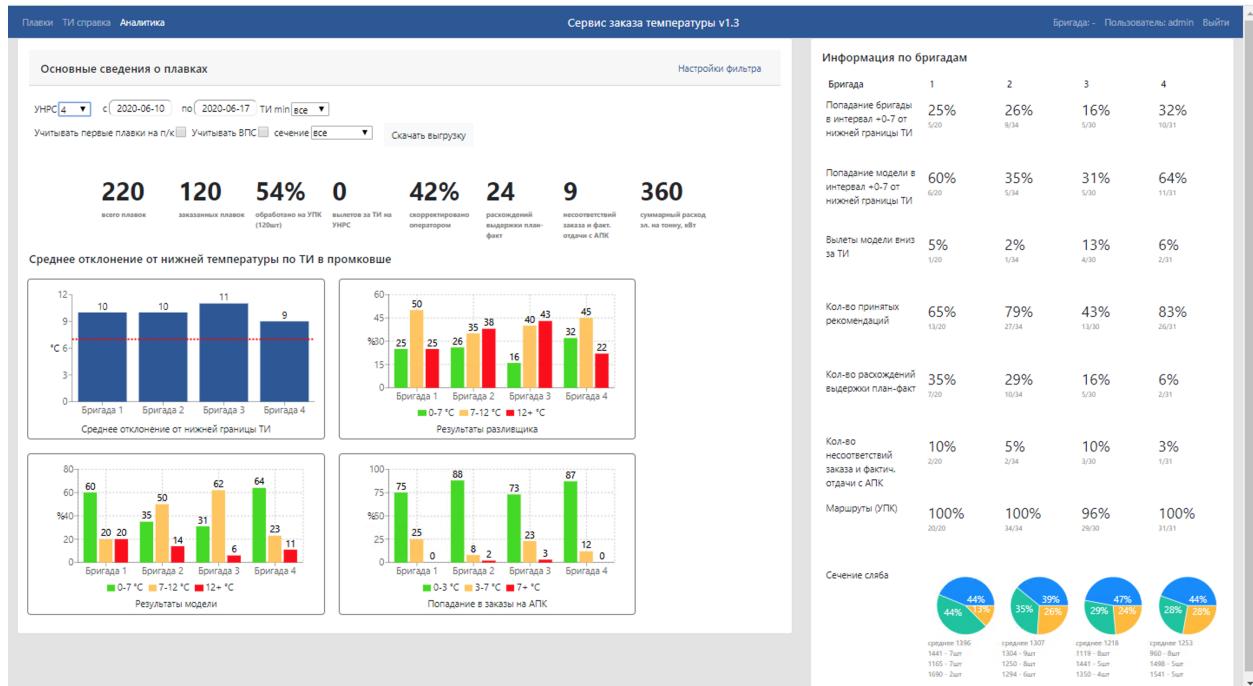


Рисунок 28 – Аналитическая страница сервиса

Переход на страницу детального просмотра плавок осуществляется по клику на гистограмме "Результаты разливщика". Интерфейс страницы просмотра таких плавок идентичен главной странице (рисунок 29) за исключением наличия фильтров по плавкам.

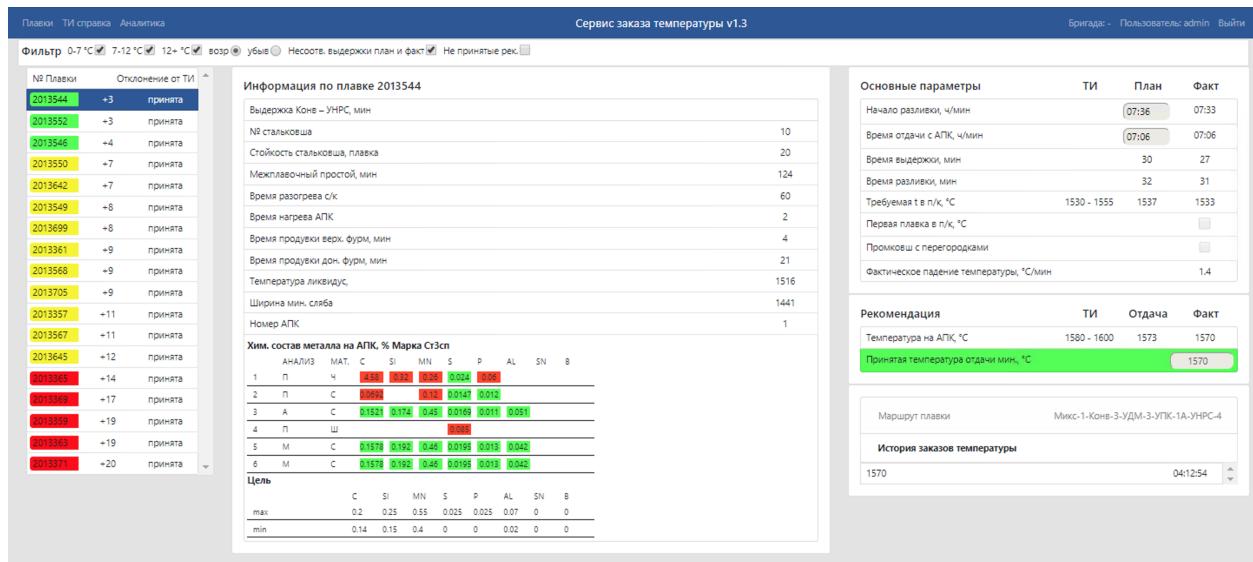


Рисунок 29 – Аналитическая страница сервиса

Заключение

Одним из участков конвертерного производства является участок УПК-УНРС, на котором производятся завершающие операции по доводке химического состава металла и получение заготовок для прокатного производства - слябов. Бригадиры разливки на УНРС определяют требуемую температуру отдачи стали с УПК, основываясь на технологических инструкциях и собственном опыте. При этом, количество параметров, учитываемых бригадиром разливки, не превышает 5-7, а их оценка носит субъективный характер. Применение методов машинного обучения может помочь бригадирам принимать правильные решения при заказе температуры посредством учета большего количества параметров конкретной плавки. Экономический эффект от применения разработанных моделей заключается в снижении затрат электроэнергии на УПК благодаря более точным заказам температуры. Параллельно достигается и технологический эффект - снижается расход электродов, а более низкая температура стали в сталеразливочном ковше продлевает срок службы футеровки.

В ходе проведения исследований исходных данных и предметной области выяснилось, что имеющиеся наборы параметров по плавкам не полны и требуют расширения. Тем не менее, был построен ряд математических моделей с использованием метода градиентного бустинга на решающих деревьях и проведена оценка их точности. Самые удачные модели превосходят человека на 3°C по показателю среднего отклонения температуры от нижней границы ТИ в промковше на наборе тестовых данных. Применение моделей в реальных условиях также показало снижение среднего отклонения температуры от нижней границы ТИ в промковше на $3\text{-}5^{\circ}\text{C}$ в зависимости от сортаментной группы, что уже приносит осязаемый экономический и технологический эффект.

Разработанный пользовательский интерфейс системы успешно решает задачи коммуникации УНРС и УПК, предоставляет начальникам участков удобные инструменты для построения аналитики. Дальнейшее развитие ра-

боты может включать в себя построение новых математических моделей на более полных наборах данных.

Список источников

1. Повоцкий Д. Я., Кудрин В. А., Вишкарёв А. Ф. Внепечная обработка стали. Москва: МИСИС, 1995. 256 с.
2. Чертов А. Д. Современный кислородно-конвертерный процесс. Липецк: ОАО «НЛМК», 2010. 198 с.
3. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали. Москва.: Мир, Издательство АСТ, 2003. 528 с.
4. Ботников С. А., Хлыбов О.С., Костычев А.Н. Разработка модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах в литейно-прокатном комплексе // Металлург. 2019. №8. С. 27-35.
5. Laine J., Holappa L., Louhenkilpi S. Temperature prediction for steel continuous casting // 2nd International Conference AdMet. Kiev. 2015. С. 1-11.
6. He F., He D., Xu A. Hybrid model of molten steel temperature prediction based on ladle heat status and artificial neural network // Journal of Iron and Steel Research. 2014. No 21. С. 181-190.
7. Wang Y., Abraham S., Bodnar R. Continuous slab superheat control at SSAB Mobile // AISTech Proceedings. 2014. С. 1647-1657.
8. Mandal K., Miller E., Pierce D. Development and implementation of an online process model for the control of steel chemistry and superheat during secondary steelmaking // AISTech Proceedings. 2012. С. 1045-1053.
9. Chen S., Dsouza C., Evans D. Continuous enhancement of the Evraz superheat model control for slab casting // AISTech Proceedings. 2012. С. 1303-1315.
10. Abraham S., Chen S. On-line superheat control model for continuously cast slabs and billets // Iron and Steel Technology. 2010. No 8. С. 89-96.
11. Роготовский А.Н., Бобылева Н.А, Шипельников А.А. Компьютерное моделирование металлургических процессов в среде современных САПР // Современные сложные системы управления: HTCS2017: мат-лы XII междунар. научн.-практ. конф., 25-27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч.1. Липецк: ЛГТУ. 2017. С.259-263.

- 12.Кабаков З. К., Пахолкова М. А. Одномерная математическая модель охлаждения металла в ковше // Вестник Череповецкого государственного университета. 2010. №4. С. 74-75.
- 13.Sampaio P., Fujii T., Antonio P.B. Neural Network Thermal Model of a Ladle Furnace // Part of the proceedings of the 10th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, 2007. 284 с.
- 14.Wang X. Ladle Furnace Temperature Prediction Model Based on Large-scale Data With Random Forest // IEEE/CAA journal of automatica sinica. 2017. №4. С. 770-774.
- 15.Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали / А. А. Метелкин [и др.]; общ. ред. А. А. Метелкина. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015. 144 с.
- 16.Великин Б. А., Карклит А. К., Колпаков С. В. Футеровка сталеразливочных ковшей. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1990. 248 с.
- 17.Берг, Х., Герлинг Р. Влияние внепечной обработки на износ футеровки сталеразливочных ковшей // Черные металлы. 2005. №6. С. 27-32.
- 18.Смирнов А.Н., Минц А.Я., Гиниятуллин Р.В. Исследования износа футеровки агрегата «ковш-печь» в условиях современного металлургического мини-завода. // Бюл. «Черная металлургия». Москва: Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований черной металлургии. 2001. №10. С. 40-47.
- 19.Стариков В. С., Темлянцев М. В., Стариков В. В. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии. Москва: МИСИС, 2008. 328 с.
- 20.Бигеев А. М., Бигеев В. А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
- 21.Дюдкин Д. А., Киселенко В. В. Производство стали. В 4 т. Т. 2. Москва: Технология, 2008. 401 с.
- 22.Роготовский А. Н. Расход электроэнергии на агрегате печь-ковш // Кадры для региона – будущее металлургии: сб. тезисов. Липецк, 2013. С. 50-52.

- 23.Егоров А. В. Ковш-печь [Электронный ресурс]: Большая российская энциклопедия [сайт]. URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2076936 (дата обращения: 01.06.2020).
- 24.Ордин В. Г., Лягин А. Б. Обработка стали на установке печь-ковш в конвертерном производстве. Череповец: ОАО «Северсталь», 2006. 26 с.
- 25.Практика конвертерного производства стали / А. В. Ярошенко [и др.]. Липецк: ОАО "НЛМК", 2012. 154 с.
- 26.Роготовский А. Н., Шипельников А. А. Разливка стали и кристаллизация слитка. Липецк: ОАО "НЛМК", 2012. 154 с.
- 27.Кабаков З. К., Пахолкова М. А. Оценка потерь тепла при охлаждении жидкой стали в ковше // Сборник докладов научно-технической конференции «Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии». Екатеринбург: ОАО «ВНИИМТ». 2010. С. 314-318.