

# Анализ транспортного запаздывания нефтепродуктов в режиме реального времени

Титарь И. А.<sup>1</sup>

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>1</sup> *tigor7750@gmail.com*

## Аннотация

В данной работе рассмотрено применение виртуальных анализаторов качества (ВАК) для прогнозирования качества нефтепродуктов в реальном времени. ВАК представляют собой программно-математические комплексы, включающие различные модели, такие как физико-математические, статистические и основанные на машинном обучении, для связывания данных контрольно-измерительных приборов (КИП) с результатами лабораторных анализов. Одним из ключевых факторов, влияющих на точность ВАК, является правильное определение транспортной задержки между точкой лабораторного контроля и датчиками.

**Ключевые слова:** виртуальные анализаторы качества, прогнозирование, программно-математические комплексы, моделирование, контрольно-измерительные приборы, транспортная задержка, регрессия.

## 1 Введение

Прогнозирование качества нефтепродуктов в реальном времени играет ключевую роль в обеспечении энергоэффективности и надежности производственных процессов в нефтяной промышленности. Для этой цели широко применяются виртуальные анализаторы качества (ВАК), которые осуществляют преобразование данных от контрольно-измерительных приборов (КИП) в параметры качества на основе моделей, объединяющих физические, математические, статистические и методы машинного обучения. Важным аспектом точности таких систем является определение времени транспортной задержки между точкой лабораторного контроля и датчиками на месте производства.

### 1.1 Описание проблемы

Транспортное запаздывание представляет собой временной интервал между моментом взятия образца на объекте (в данном случае, на месте производства) и моментом его анализа в лаборатории. Это время может оказывать существенное влияние на качество продукции и управление производственными процессами.

### 1.2 Актуальность

Точное определение транспортного запаздывания имеет важное значение для обеспечения качества и эффективности производства нефтепродуктов. Недооценка этого параметра может привести к некорректным решениям, основанным на данных, которые устарели к моменту анализа, что может привести к потере качества продукции или даже к нежелательным последствиям для безопасности сотрудников и экологии.

### 1.3 Существующие решения

Существует несколько подходов к решению проблемы определения транспортного запаздывания, включая статистические методы, аналитические модели и использование данных машинного обучения. Для разработки эффективного алгоритма расчета транспортного запаздывания требуется учет конкретных условий и характеристик производственного процесса, а также адаптация к изменяющимся условиям. Некоторые компании используют для решения данной задачи цифровые двойники. Они могут оптимизировать производство, прогнозировать отказ оборудования и управлять рисками для повышения эффективности и безопасности.

процессов. Однако, на сегодняшний день цифровые двойники в нефтяной промышленности сложны в интеграции разнородных данных и обеспечении их согласованности, а также требуют больше времени и ресурсов.

## 2 Решение

### 2.1 Постановка задач

- Провести анализ данных с контрольно-измерительных приборов (КИП), расположенных внутри установки, и данных лабораторного контроля на выходе с установки, представленных в таблицах.
- Рассчитать транспортное запаздывание нефтепродуктов, которые смешиваются в коллекторе, используя физические соображения и имеющиеся данные.
- Разработать алгоритм для расчета транспортного запаздывания для конкретного датчика относительно лаборатории на основе анализа данных одного датчика и лаборатории.
- Применить корреляционный анализ и другие соответствующие методы для выявления зависимостей между данными датчиков КИП и лаборатории, а также для уточнения алгоритма расчета транспортного запаздывания.
- Разработать REST API сервис, который по запросу будет рассчитывать время транспортного запаздывания для каждой из представленных схем.

### 2.2 Описание физической модели

Для расчета запаздывания нефтепродуктов, смешиваемых в коллекторе, необходимо вывести интегральное уравнение задержки потока. Нам известно, что расход несжимаемой жидкости в трубопроводе имеет вид:

$$Q = S \cdot v$$

где:  $S$  - площадь поперечного сечения трубы,  $v$  - скорость потока.

Для цилиндрической трубы сечение  $S$  можно выразить через ее диаметр  $D$ :

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

Подставляя это выражение в уравнение для объемного расхода  $Q$ , получаем:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v$$

где:  $Q$  - расход нефтепродукта ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ),  $D$  - внешний диаметр трубопровода ( $\text{м}$ ),  $v$  - скорость потока ( $\text{м}/\text{с}$ ). Скорость потока можно найти из этого уравнения:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Теперь мы можем записать уравнение Дарси-Вейсбаха, описывающее потери давления в трубопроводе:

$$\Delta P = \frac{fL}{D} \frac{\rho v^2}{2}$$

где:  $\Delta P$  - потери давления ( $\text{Па}$ ),  $f$  - коэффициент трения,  $L$  - длина трубопровода ( $\text{м}$ ),  $\rho$  - плотность жидкости ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $v$  - скорость потока ( $\text{м}/\text{с}$ ). Теперь нам нужно выразить  $\Delta P$  через  $Q$ , чтобы получить интегрально-дифференциальное уравнение задержки потока. Подставляя  $v$  в уравнение Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \frac{fL}{D} \frac{\rho(4Q/\pi D^2)^2}{2}$$
$$\Delta P = \frac{fL\rho Q^2}{\pi^2 D^5}$$

У нас есть выражение для потерь давления в зависимости от расхода  $Q$ . Исходя из уравнения непрерывности и уравнения Эйлера для несжимаемой жидкости, уравнение для изменения времени  $\Delta t$  при движении жидкости вдоль участка длины  $L$  имеет вид:

$$\Delta t = \int_0^L \frac{\Delta P}{\rho v} dl$$

где  $\Delta P$  - изменение давления,  $\rho$  - плотность жидкости,  $v$  - скорость жидкости, а  $dl$  - элементарный участок пути.

$$\Delta t = \int_0^L \frac{\Delta P}{\rho v} dl$$

Здесь  $dl$  - бесконечно маленький элемент длины трубопровода. Подставляя  $\Delta P$  и  $v$ , мы можем выразить интеграл:

$$\Delta t = \int_0^L \frac{fL}{\pi^2 D^5} \frac{1}{v^2} dl = \frac{fL}{\pi^2 D^5} \int_0^L \frac{1}{v^2} dl = \frac{fL}{\pi^2 D^5} \int_0^L \frac{1}{(4Q/\pi D^2)^2} dl$$

Теперь подставим выражение для  $v$ :

$$\Delta t = \frac{fL}{\pi^2 D^5} \int_0^L \frac{1}{(4Q/\pi D^2)^2} dl = \frac{fL}{16\pi D^7} \int_0^L \frac{D^4}{Q^2} dl = \frac{fL}{16\pi D^3} \int_0^L \frac{D^4}{Q^2} dl = \frac{fL}{16\pi D^3} D^4 \int_0^L \frac{1}{Q^2} dl$$

Получаем искомое уравнение задержки потока:

$$\Delta t = \frac{fL}{16\pi D^3} D^4 \frac{L}{Q^2} = \frac{fL^2 D}{16\pi Q^2}$$

## 2.3 Программная часть

Проведём корреляционный анализ, рассмотрев три вида корреляций:

Корреляция Пирсона, которая используется для измерения корреляции между двумя непрерывными переменными, показала средний результат 0.76.

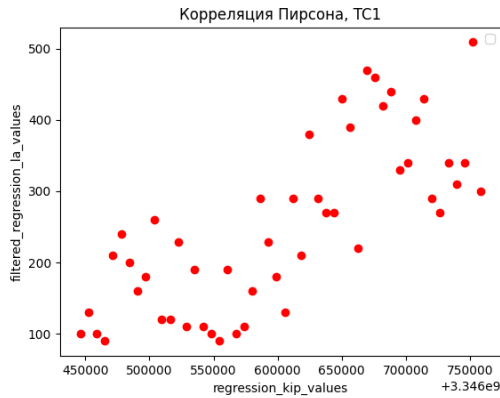


Рис. 1: TC1

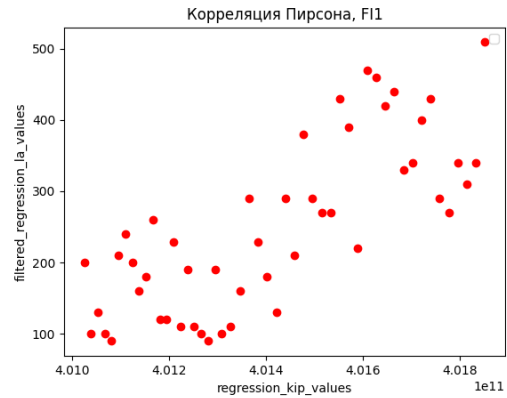


Рис. 2: FI1

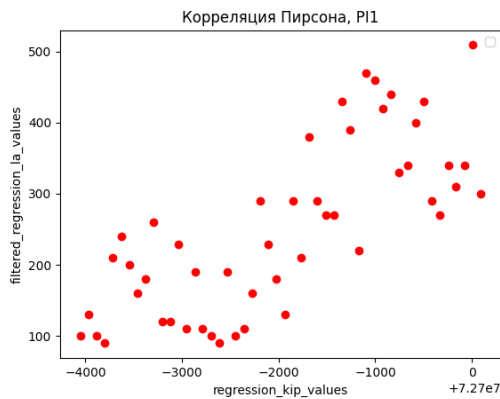


Рис. 3: PI1

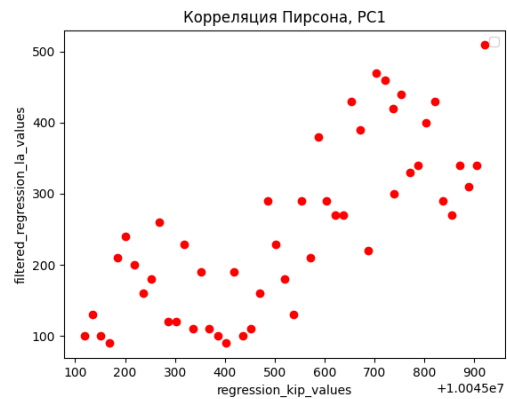


Рис. 4: PC1

Корреляция Спирмена, которая используется для измерения корреляции между двумя ранжированными переменными, показала средний результат составил 0.77

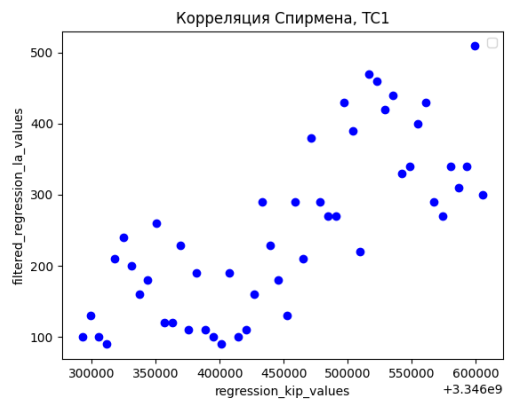


Рис. 5: TC1

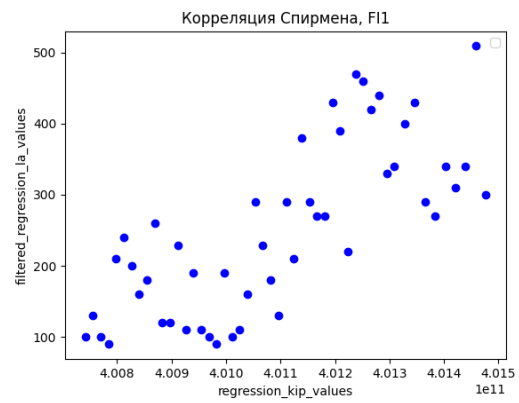


Рис. 6: FI1

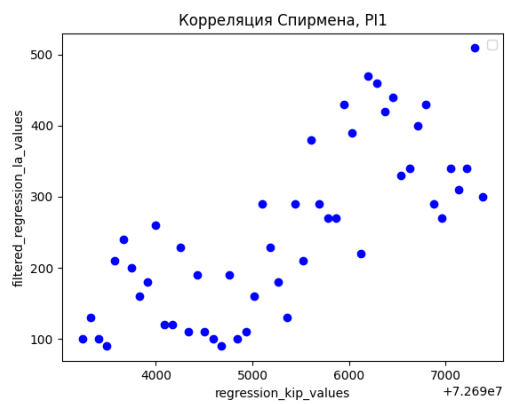


Рис. 7: PI1

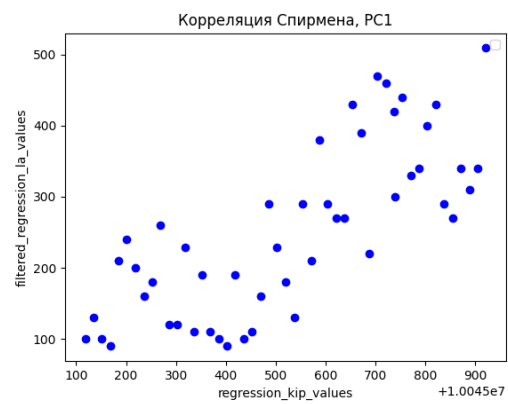


Рис. 8: PC1

Корреляция Кендалла используется, когда размер выборки мал и имеется много связанных рангов. Ее средний результат составил 0.54

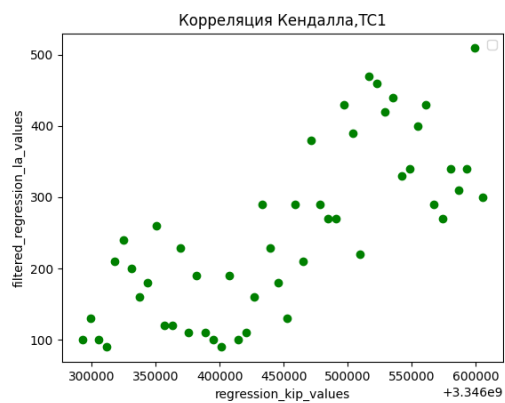


Рис. 9: TC1

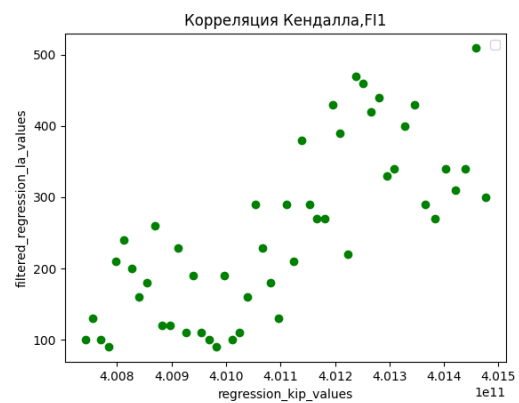


Рис. 10: FI1

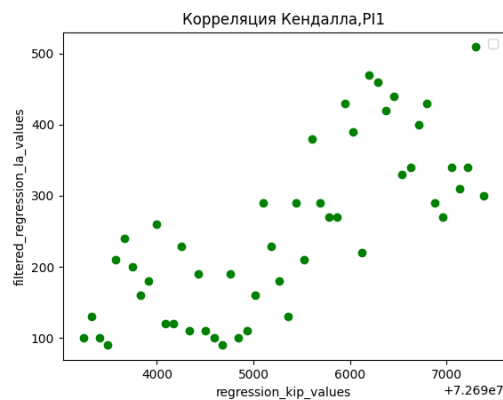


Рис. 11: PI1

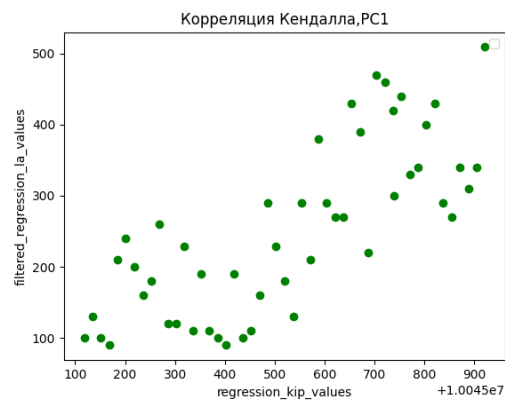


Рис. 12: PC1

Таблица 1: Таблица использование корреляционных функций на данных с датчиков КИП

Тип корреляции	Тип датчика	Значение
Пирсона	TC1	0.753
Спирмена	TC1	0.773
Кендалла	TC1	0.534
Пирсона	FI1	0.766
Спирмена	FI1	0.773
Кендалла	FI1	0.535
Пирсона	PI1	0.753
Спирмена	PI1	0.773
Кендалла	PI1	0.535
Пирсона	PC1	0.762
Спирмена	PC1	0.778
Кендалла	PC1	0.546

Пронализировав рданные таблицы было принято решение использовать корреляцию Спирмена

Перейдём к разработке алгоритма, рассчитывающего транспортное запаздывание для конкретного датчика, относительно лаборатории. Для этого применим метод скользящего окна, который будет перемещать окно заданной длины по массиву seq2 и вычислять корреляцию с каждой подпоследовательностью из seq1.

Сперва необходимо создать функции фильтрации данных, анализа выбросов и проанализировать временные ряды.

Для этого создадим модель, которая будет удовлетворять основным принципам ООП и SOLID, что сделает код модульным, понятным и простым для дальнейшей поддержки. Краткое описание классов файла regression service:

Класс *DataConverter* отвечает за преобразование данных из одного формата в другой. Он содержит методы для преобразования строк в даты и времена, а также для преобразования строковых значений в числа с плавающей запятой.

*CorrelationCalculator* отвечает за расчет корреляций между двумя последовательностями данных. Он использует методы Пирсона, Спирмена или Кендалла для расчета корреляции в зависимости от выбранного типа.

*ArrayMatcher* отвечает за сопоставление элементов двух массивов на основе заданного делителя. Он используется для сопоставления массивов данных.

*RegressionProcessor* отвечает за обработку данных регрессии. Он содержит метод для фильтрации массивов данных на основе максимального значения.

*TimeDeltaCalculator* отвечает за расчет разницы во времени между элементами. Он содержит метод для вычисления минимальной разницы во времени из словаря разниц времени.

*ValueFilter* отвечает за фильтрацию значений в массиве данных на основе заданного порогового значения.

Класс *RegressionImplementation* координирует процесс анализа регрессии. Он содержит метод для выполнения всего процесса анализа, включая фильтрацию, расчет корреляции, сопоставление массивов и обработку результатов.

Модель *Mixingservice* по своей сути программная реализация физической модели, поэтому ее детальное программное описание приводиться не будет.

Перейдем к REST API, которое предоставляет доступ к ресурсам через стандартные HTTP методы: *GET*, *POST*, *PUT* и *DELETE*, используя URL-адреса для идентификации ресурсов. Можно протестировать используя curl:

```
it@ittech:~/Sword-15-A120E:~$ curl -X POST http://127.0.0.1:5000/api
/regression -H "Content-Type: application/json" -d '{
  "regression_kip": [ ["01.01.2021", "0:00", "334.6292725"], ["01.0
1.2021", "0:01", "334.6299133"], ["01.01.2021", "0:02", "334.6305542
"], ["01.01.2021", "0:03", "334.6311951"]],
  "regression_la": [ ["03.01.2021", "2:00", "2.1"], ["07.01.2021",
"2:00", "1.9"], ["10.01.2021", "2:00", "2.3"], ["12.01.2021", "2:00
", "2.5"] ]
}'
[
  180000.0,
  179940.0,
  179880.0,
  179820.0
]
```

Рис. 13: Тестовый запрос

Библиотека *Requests* в *Python* позволяет отправлять HTTP запросы к REST API и обрабатывать полученные ответы, обеспечивая простой и удобный интерфейс для взаимодействия с веб-сервисами. Отправка запросов с помощью *Requests* предстваленна в файле *regressionrequests.py* и *mixingrequests.py*. Сервисный слой реализован в *mixingservice.py* и *regressionservice.py*. Для удобства можно воспользоваться Swagger документацией api по ссылке [документация Swagger](#)

POST /api/mixing Обрабатывает данные для смешивания. post\_api\_mixing

Parameters Try it out

Name	Description	Example Value	Model
regression_data * required (body)		<pre>{   "regression_kip": [     0   ],   "regression_la": [     0   ] }</pre>	

Parameter content type  
application/json

Рис. 14: Эскиз документации

### 3 Анализ полученных результатов, выводы

Таким образом было определено транспортное запаздывание для нефтепродуктов, смешиваемых в коллекторе, с использованием физических соображений и доступных данных. Разработан алгоритм для расчета времени транспортного запаздывания для конкретного датчика относительно лаборатории, основанный на анализе данных этого датчика и лаборатории. Был применён метод корреляционного анализа для выявления зависимостей между дан-

ными датчиков КИП и лаборатории, что позволило уточнить алгоритм расчета транспортного запаздывания. Разработан REST API сервис, способный по запросу рассчитывать время транспортного запаздывания для каждой из представленных схем.

Проблема транспортного запаздывания нефтепродуктов является критической для обеспечения качества продукции и эффективного управления производственными процессами, подчеркивая необходимость разработки эффективных методов его расчета и мониторинга.

Ссылка на решения [github](#)

## Список литературы

- [1] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц "Гидродинамика"
- [2] Ламб Г. "Гидродинамика"
- [3] Ларионов В.М Филипов С.Е. "Введение в гидродинамику"