

Анализ стратегий оптимизации планов дозаправок вдоль автомобильного маршрута в условиях ограничения числа дозаправок

М. С. Есин

Санкт-Петербургский
Федеральный
исследовательский центр РАН
mse@dscs.pro

А. А. Корепанова

Санкт-Петербургский
Федеральный
исследовательский центр РАН
aak@dscs.pro

А. А. Сабреков

Санкт-Петербургский
Федеральный
исследовательский центр РАН
aas@dscs.pro

Аннотация. В работе рассматривается задача оптимизации плана дозаправок на фиксированном маршруте с целью минимизации затрат на топливо. Модель учитывает расположение заправочных станций, параметры автомобиля, варьирующуюся стоимость топлива и ограничение на общее число остановок. В качестве точного решения используется точный алгоритм, основанный на методах динамического программирования. Цель исследования заключается в количественной оценке эффективности и практической применимости точного метода в сравнении с эвристическими подходами, имитирующими поведение водителей с различным уровнем склонности к риску. В качестве метрик рассматривались средняя итоговая стоимость плана дозаправок, среднее число остановок по пути, а также устойчивость метода, определяемая как доля успешных построений плана для тестового маршрута. Проведённые эксперименты показывают преимущество точного подхода в большинстве сценариев и подчёркивают его потенциал для последующего расширения на более сложные модели.

Ключевые слова: оценка стоимости пути, задача оптимизации, выбор заправочных станций, система принятия решений

I. ВВЕДЕНИЕ

По данным Росстата, в России по итогам 2023 года функционирует порядка 30 тыс. автозаправочных станций на 1124,5 тыс. километров твёрдого дорожного полотна, что по плотности заправочной инфраструктуры сравнимо с крупными странами ЕС, такими как Франция и Польша. Текущий уровень развития сети автозаправочных станций в России создаёт возможности для оптимизации топливных расходов как при транспортировке грузов, так и при реализации программ автотуризма путём выбора наиболее экономичных вариантов заправки [1].

Автомобильный транспорт в России выполняет стратегически важные задачи логистики: обеспечивает доставку грузов «до двери», обслуживает территории без железнодорожной инфраструктуры и гарантирует оперативность перевозок на средние расстояния. Увеличение в 2023 году средней дальности грузовой автомобильной перевозки на 10 % и рост коммерческого автомобильного грузооборота на 16 % указывают на рост

потребности в эффективном управлении топливными ресурсами при осуществлении автомобильных маршрутов, поскольку топливная составляющая может достигать до 40 % от стоимости перевозки [2]. Кроме того, в 2023 году по данным Росстата междугородний автобусный пассажиропоток увеличился на 11 %, что дополнительно акцентирует внимание на задачах, связанных с автоматизацией принятия решений о заправках на длинных маршрутах.

В этих условиях, помимо задач снижения расхода топлива [3], актуальными становятся задачи оптимизации планов дозаправки (выбора станций) при движении по фиксированному маршруту, учитывающие такие параметры, как вариативность цен на топливо, ограниченный объём топливного бака, ограниченное число остановок и территориальную доступность заправочной инфраструктуры. При росте вариативности и протяжённости автомобильных маршрутов актуальны алгоритмически обоснованные решения, способные обеспечить снижение затрат на топливо при ограниченном числе остановок и высокой надёжности исполнения маршрута. Однако, согласно предыдущим исследованиям [4–6] оптимальность плана дозаправок по стоимости зачастую подразумевает высокое число остановок, что негативно сказывается на практической применимости точных алгоритмов в сравнении с удобными, но не оптимальными эвристическими стратегиями.

Объектом исследования является задача дискретной оптимизации плана прохождения фиксированного автомобильного маршрута с учетом дозаправок по пути. Целью оптимизации является снижение расходов на топливо за счет выбора заправочных станций и объемов заправленного на них топлива. Задача глобальной оптимизации топливных расходов на проезд от точки А до точки Б, требующая анализа всей сети возможных маршрутов и заправочных станций, в данном исследовании не рассматривается.

Цель исследования заключается в количественной оценке эффективности и практической применимости аналитического метода в решении задачи оптимизации в сравнении с эвристическими подходами, имитирующими поведение водителей с различным уровнем склонности к риску. К методам исследования

относятся алгоритмизация существующих эвристических стратегий на основе поведенческих паттернов, подтвержденных статистическими исследованиями, проведение серии численных экспериментов для оценки значения соответствующих метрик эффективности методов на различных тестовых классах, а также сравнительный анализ полученных значений с целью оценки эффективности и устойчивости эвристических стратегий по отношению к точному алгоритму. Среди метрик, описывающих эффективность того или иного метода, рассматривались средняя итоговая стоимость плана дозаправок, среднее число остановок по пути, а также устойчивость метода, выражающаяся в доле успешных построений плана для тестового маршрута.

Структура работы устроена следующим образом. В разделе «Обзор релевантных работ» приводится анализ существующих публикаций и опросов с целью дальнейшего формирования набора эвристических методов, моделирующих поведение разных групп водителей. В разделе «Формализация задачи» приведена постановка задачи в терминах линейного программирования, для которой авторами ранее был предложен точный алгоритм. В разделе «Методология эксперимента» приведены вариации различных эвристических методов, используемых в сравнении, а также описание тестовых классов входных данных, на которых проводится сравнение эффективности подходов. В разделе «Результаты» приведена оценка эффективности и применимости точного алгоритма в сравнении с предложенными эвристиками.

II. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Топливная составляющая является одной из ключевых статей затрат в автомобильных перевозках, особенно в России, где она может достигать до 40% от общей стоимости рейса [2]. Официальные методики расчета расхода топлива, предложенные Минтрансом РФ, несколько не соответствуют действительности [7], что вероятно связано с высоким числом факторов, влияющих на расход, и непрозрачностью степени их влияния [3]. В таких условиях именно рациональное планирование дозаправок при наличии даже приблизительной оценки расхода топлива представляет собой значимый резерв для повышения эффективности логистических процессов. Практика европейских стран, где экономия достигается за счёт выбора более выгодных по цене заправочных станций [1], подтверждает эффективность подобных стратегий и актуальность их применения.

Задача оптимизации расходов при транспортировке с учетом заправочных станций обобщается задачей GSP (gas station problem) которая часто решается только для полных взвешенных графов, вершины которых соответствуют заправкам, а вес ребер – расходом топлива для перемещения от одного конца до другого [8]. В [9, 10] показано, что эвристики, использующие информацию обо всех заправках сразу, работают существенно быстрее точных методов при незначительной потере качества. Однако, настоящее исследование фокусируется на сравнении оптимального решения (полученного в отрыве от времени выполнения

программы и использования памяти) с результатами, получаемыми в условиях, приближенных к реальному поведению водителей. Поскольку водители обладают ограниченными когнитивными ресурсами и неполной информацией о предстоящих заправках, в качестве эвристических стратегий рассматриваются исключительно те подходы, которые опираются на локальное окружение — так называемые оконные методы, ограничивающие область принятия решения фиксированным числом ближайших узлов маршрута.

При анализе поведенческих стратегий водителей при выборе момента и места дозаправки особую ценность представляют статистические опросы. Согласно данным исследования Auto.ru¹, около 85 % респондентов предпочитают заправляться, когда уровень топлива опускается ниже трети бака, при этом 29% делают это лишь при срабатывании индикатора минимального остатка. В опросе исследовательской компании 4Service² была проведена поведенческая сегментация, согласно которой 32 % водителей отнесены к категории «рационалистов», отдающих приоритет цене топлива и стремящихся заправляться на наиболее выгодных станциях, тогда как остальные участники руководствуются иными факторами: качеством топлива, узнаваемостью бренда, отсутствием очередей или наличием сопутствующего сервиса. Результаты исследования ScanMarket³ показывают, что лишь 40% автовладельцев предпочитают заправку на полный бак. Однако, согласно другому исследованию⁴ той же компании, до полного бака заправляются только 15 % опрошенных. Также, согласно опросу портала Drom.ru⁵, 89 % респондентов интересуются ценами на топливо, а 47 % готовы сравнивать цены и предпринимать другие активные действия для более выгодной дозаправки.

Эти данные подтверждают наличие разнообразных стратегий заправки, используемых водителями на практике, и позволяют выделить ряд устойчивых поведенческих паттернов. В настоящем исследовании выделены и реализованы три эвристических подхода, отражающих выявленные поведенческие паттерны. Эвристика с порогом остатка топлива моделирует стратегию водителей, ориентирующихся на уровень топлива в баке и заправляющихся при достижении критического значения. Оконная эвристика с двусторонним анализом ближайших станций соответствует поведению, основанному на ограниченной локальной информации. Эвристика с чувствительностью к цене частично моделирует поведение «рационалистов», стремящихся минимизировать затраты за счёт выбора более дешёвых заправок в пределах ближайшего окружения. Таким образом, предлагаемые эвристики, с

¹ Опрос портала Auto.ru «Где, как и чем заправляетесь?» — <https://auto.ru/mag/article/pollaboutfuelstations/>

² Отчет компании 4Service об этапах выбора АЗС — <https://4service.company/ru-kz/blog/etapy-vybora-azs>

³ Исследование клиентов АЗС от портала СканМаркет — <https://scanmarket.ru/markets-detail/issledovanie-klientov-azs>

⁴ Исследование розничного рынка АЗС от портала СканМаркет — <https://scanmarket.ru/markets-detail/issledovanie-rynka-azs-regiona>

⁵ Опрос портала Drom.ru — <https://www.drom.ru/poll.php?pollid=460>

одной стороны, соответствуют реальным условиям ограниченной информированности водителя на маршруте, а с другой – опираются на эмпирически зафиксированные модели поведения, выявленные в результате массовых социологических опросов автолюбителей.

III. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Для корректного проведения сравнительного анализа и точной интерпретации полученных результатов необходимо строго зафиксировать постановку задачи оптимизации и определить, что в рамках данного исследования считается точным решением задачи.

При постановке задачи считается, что заданный маршрут является фиксированным и представлен в виде последовательности из N равноотстоящих узлов, где первый узел – начало маршрута, а последний – конец. Делением бака будем считать объем топлива, необходимый для перемещения между соседними узлами маршрута. Заправка допустимого числа делений бака возможна только в узлах, для которых известна цена за деление нужного типа топлива, в других узлах цена за деление бака полагается равной заведомо большому числу inf . Дополнительно заданы объем бака в делениях V_{max} , начальное и конечное количество топлива V_S и V_F (в делениях), а также верхняя граница допустимого числа остановок в плане T_{max} .

Планом задачи будем называть N -мерный вектор F , где $F[i]$ обозначает число делений, заправленных в i -ом узле. Тогда задачу оптимизации можно представить в виде задачи минимизации целевой функции со следующими ограничениями на допустимые планы:

$$\sum_{i=0}^{N-1} F[i] \times C[i] \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} 0 \leq F[i] < V_{max} \text{ для } 0 \leq i < N \\ V_S + \sum_{i=0}^n F[i] \geq n + 1 \text{ для } 0 \leq n < N - 1 \\ V_S + \sum_{i=0}^n F[i] - n \leq V_{max} \text{ для } 0 \leq n < N \\ V_S + \sum_{i=0}^{N-1} F[i] - N - 1 = V_F \end{cases}$$

Дополнительно на вектор F накладывается существенное ограничение: число ненулевых компонент вектора, то есть количество остановок в плане, не должно превышать T_{max} .

Реализация точного метода для решения подобной задачи приведена авторами в [5, 6], где был предложен алгоритм динамического программирования, построенный на четырёхмерном пространстве состояний. Состояние описывается кортежем из четырёх параметров: номер последнего посещённого узла, оставшееся количество делений топлива в баке, число уже совершённых остановок для дозаправки и бинарный признак, отражающий факт заправки в текущем узле.

Таким образом, была зафиксирована формальная постановка задачи оптимизации плана дозаправок с ограничением на число дозаправок, точное решение которой будет служить эталоном для сравнительного анализа эвристических методов, описанных в следующем разделе.

IV. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью эксперимента является количественная оценка качества решений, получаемых эвристическими стратегиями, моделирующими поведение водителей, по отношению к эталонным (оптимальным) решениям, полученным с использованием точного алгоритма.

В рамках эксперимента были реализованы три метода, моделирующие принятие решений водителя на основе неполной информации о заправочной инфраструктуре. Ограничение методологии связано с тем, что более сложные эвристики противоречили бы условию ограниченных когнитивных способностей водителя за рулем. Каждый метод дополнительно конфигурировался по ключевому признаку, что в совокупности дало 9 эвристических конфигураций.

A. Пороговая эвристика

Поиск ближайшей заправки начинается при достижении критического уровня остатка топлива. Стратегия моделирует поведение водителей, ориентирующихся на интуитивный уровень «низкого бака» без дополнительного рассмотрения ближайших доступных заправочных станций.

Конфигурируемым параметром является критический уровень остатка топлива в баке, при котором водитель начинает искать ближайшую заправочную станцию впереди, чтобы заправиться до полного бака. Параметр выражается в доле бака и принимает три конфигурации: 0.3, 0.2 и 0.1 согласно предположению о том, что 85 % водителей начинают искать заправку при остатке трети бака, а 29 % – при загоревшемся индикаторе.

B. Оконная эвристика

Аналогично пороговой эвристике, в данном методе поиск заправки инициируется при достижении заранее заданного уровня остатка топлива. Пороговое значение настраивается параметрически, в результате чего формируются три конфигурации оконной эвристики. Однако финальное решение о заправке принимается на основе анализа цен на станциях в рамках фиксированного окна вокруг текущей позиции: впереди и позади на 10 узлов. Так модель предполагает частичную осведомлённость водителя о ближайшей инфраструктуре.

Если цена топлива в текущем узле не более чем на 5 % превышает минимальную в окне, то совершается заправка до полного бака. Если выясняется, что доехать до края окна без дозаправки в текущем узле невозможно, то заправка производится до полного бака. Размер окна был выбран из соображений о том, что, согласно правилам дорожного движения, водитель не может ехать дольше 9–10 часов в сутки. Предполагается, что при средней скорости движения, равной 70 км/час, и маршруту, равному 1000 узлам, выбранный размер окна

примерно соотносится с когнитивными возможностями восприятия навигационной информации за рулем.

С. Оконная эвристика с частичной заправкой

Данная эвристика отличается от предыдущей модификации тем, что водитель может заправляться не на полный бак. Объем дозаправки определяется на основе отклонения текущей цены от минимальной в окне. При высокой цене выполняется минимальная дозаправка, при низкой – максимальная, при этом границы допустимого объема дозаправки согласуются с остатком топлива и максимальным объемом бака. Конфигурируемый параметр аналогично формирует 3 модификации метода.

Данная модификация соотносится с паттерном поведения группы «рационалистов», которые составляют 32% опрошенных и обычно выбирают место заправки, ориентируясь преимущественно на цену топлива, стараясь заправляться там, где дешевле.

Эксперименты проводились на синтетических маршрутах длиной 1000 узлов, при этом каждый узел представлял потенциальную позицию для размещения заправочной станции. Цены на топливо генерировались согласно закону нормального распределения. Тестовое пространство разбивалось на классы по двум независимым параметрам:

- Доля маршрута, проходимая на одном полном баке, которая выражалась от 0.15 до 0.75 с шагом 0.05 (13 классов). Этот параметр определяет максимальное расстояние между заправками, преодолеваемое без остановки.
- Вероятность наличия заправочной станции в узле, которая выражалась от 0.1 до 0.8 с шагом 0.05 (15 классов). Этот параметр характеризует плотность заправочной инфраструктуры на маршруте.

Предложенные эвристические методы были протестированы на всех тестовых классах (по 5 случайно сгенерированных тестов на каждый класс). Среди полученных на каждом тесте эвристических решений для дальнейшего сравнения было выбрано лучшее по стоимости. Число остановок в этом лучшем решении использовалось для ограничения числа дозаправок в точном решении, что позволило повысить прикладную релевантность сравнения и избежать нереалистичных планов с избыточным числом остановок.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных численных экспериментов говорят об устойчивом преимуществе точного метода в сравнении с приведенными эвристическими методами. На рис. 1 показана зависимость между выигрышем в стоимости и входными параметрами маршрута и автомобиля. При аналогичном числе дозаправок точный алгоритм позволяет сэкономить от 2 % до 6 % в зависимости от параметров маршрута и транспортного средства, задающих тестовый класс. При этом среднее число остановок в решениях примерно сопоставимо: 4.07 остановок у точных решений и 4.16 остановок у решений от эвристики.

Среди эвристик наилучшие результаты продемонстрировала оконная стратегия с порогами 0.2 и 0.3. В то же время эвристики с агрессивными критическими отметками (0.1) в пороговой и в оконной модификации, показали низкую надёжность: успешное построение маршрута фиксировалось лишь в 75% случаев.

Ранее в отдельном исследовании [4] авторами сравнивались точный алгоритм для той же задачи оптимизации, но без ограничений на число заправок, и пороговая эвристика, описанная в данном исследовании. Тогда точное решение обеспечивало экономию от 5.2% до 10%, но предполагало в среднем в 2 раза большее число остановок, чем минимально возможное количество. В настоящей работе были проведены дополнительные измерения: точный метод с ограничением на число остановок (равным числу остановок в решении пороговой эвристики) сравнивался с той же эвристикой. Неожиданно оказалось, что даже при этом ограничении точный метод сохраняет значительное преимущество – от 3.7 % до 9.8 % по стоимости маршрута, что подтверждает его практическую ценность при сохранении реалистичных ограничений на количество дозаправок.

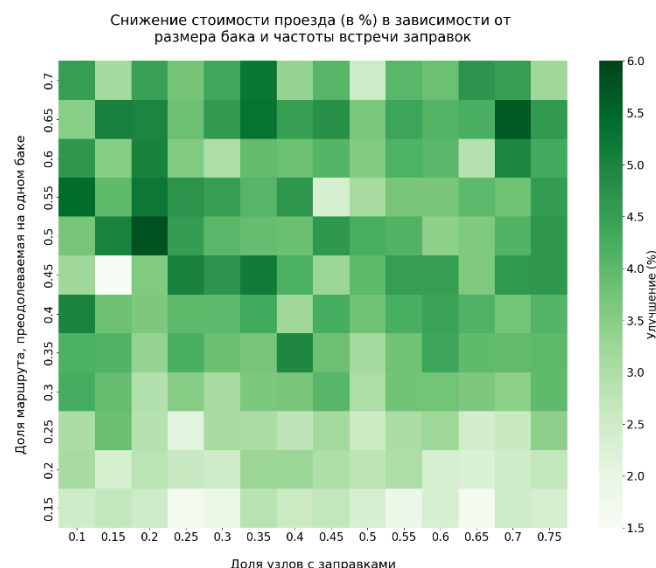


Рис. 1. Влияние параметров маршрута и авто на разницу в стоимости

Дополнительно стоит отметить, что выигрыш точного метода по сравнению с эвристиками уменьшается при снижении доступного объема бака (что соответствует нижним значениям по оси ординат на тепловой карте). Это объясняется тем, что при небольшом запасе хода пространство возможных стратегий и вариантов оптимизации сужается — водитель (алгоритм) вынужден заправляться чаще и менее избирательно, что нивелирует эффект от интеллектуального выбора станций и объемов дозаправки.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании была рассмотрена задача построения оптимального плана дозаправок на фиксированном маршруте с ограничением на число остановок. Для сравнения с точным алгоритмом были реализованы три

класса эвристических методов, основанных на статистически подтверждённых поведенческих паттернах водителей. Проведён численный эксперимент на синтетических тестовых данных, варьирующих параметры автомобиля и дорожной инфраструктуры.

Результаты показали, что даже при ограничении числа дозаправок точный метод сохраняет заметное преимущество по стоимости маршрута по сравнению с эвристиками, обеспечивая экономию до 6 % при аналогичном числе остановок. В качестве дальнейших направлений развития планируется расширение постановки задачи за счёт учёта динамического расхода топлива, зависящего от веса, рельефа или плотности трафика, а также решение задачи более высокой размерности [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kovács G. Optimization method and software for fuel cost reduction in case of road transport activity // *Acta Polytechnica*. 2017. No. 57. DOI: 10.14311/AP.2017.57.0201.
- [2] Курганов В.М., Дорофеев А.Н., Грязнов В.М. Нормирование расхода топлива с использованием информационных технологий // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2018. Т. 15, № 2(60). С. 237–248. DOI: 10.26518/2071-7296-2018-2-237-248.
- [3] Romero C.A., Correa P., Ariza Echeverri E.A., Vergara D. Strategies for Reducing Automobile Fuel Consumption // *Applied Sciences*. 2024, No. 14. DOI: 10.3390/app14020910.
- [4] Есин М.С., Корепанова А.А., Сабреков А.А., Абрамов М.В. Логистический портал Cargotime.ru: сравнительный анализ стратегий оптимизации планов дозаправок // *Материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов «Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности 2025»*. 2025. С. 96–101.
- [5] Zolotikh D.A., Sabrekov A.A., Esin M.S., Korepanova A.A. Automating the Construction of an Optimal Refuelling Plan along a Car Route Taking into account the Limit on the Number of Stops // *XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements*. 2024, pp. 389-392. DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554122.
- [6] Золотых Д.А., Есин М.С., Корепанова А.А., Сабреков А.А. Автоматизация построения оптимального плана дозаправок вдоль автомобильного маршрута с учётом ограничения на число остановок // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2024. Т. 1. С. 510–514.
- [7] Курганов В.М., Грязнов М.В., Дорофеев А.Н. Планирование и учет расхода автомобильного топлива в электронных путевых листах // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2023. № 3(59). С. 67–79. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-3-67-79.
- [8] Khuller S., Malekian A., Mestre J. To fill or not to fill: The gas station problem // *ACM Trans. Algorithms*. 2011, No. 7(3). DOI: 10.1145/1978782.1978791.
- [9] Zhao S., Nandy A., Choset H., Rathinam S., Ren Z. Heuristic Search for Path Finding With Refuelling. // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2025, Vol. 10, No. 4, pp. 3230-3237. DOI: 10.1109/LRA.2025.3540736
- [10] Papadopoulos K., Christofides D. A fast algorithm for the gas station problem // *Information Processing Letters*. 2018, Vol. 131, pp. 55-59. DOI: 10.1016/j.ipl.2017.11.009.
- [11] Есин М.С., Абрамов М.В. Построение оптимального плана дозаправок с использованием агрегированных сведений о значениях параметров маршрута из открытых источников // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2025. Т. 25, № 2.