

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НА ГАЗОПРОВОДАХ

С. А. Максудова<sup>а</sup>, А. В. Гавриленко<sup>б</sup>

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

<sup>а</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3139-3770>, [maksofal20@mail.ru](mailto:maksofal20@mail.ru)

<sup>б</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1837-5698>, [gavrilenko.anna.v@gmail.com](mailto:gavrilenko.anna.v@gmail.com)

*Аннотация:* в статье описан подход к созданию расчета траектории полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для обнаружения утечек из магистралей. Основой нового подхода предлагается сделать систему симуляционного моделирования полета беспилотного летательного аппарата при решении задачи эффективного поиска утечки метана из магистрального трубопровода. Ключевой задачей является поиск оптимальных траекторий движения беспилотного летательного аппарата, решение которой существенно повысит вероятность обнаружения утечек с учетом ряда климатических факторов.

Текущие результаты симуляционного моделирования показывают существенное различие вероятности обнаружения утечки с последующей локализацией облака утечки при использовании разработанного подхода от вероятности обнаружения утечки при подходе с параллельным облетом газопровода. Можно отметить, что для метеоусловий с силой ветра 0-2 балла параллельное движение БПЛА относительно трубопровода показывает достаточную эффективность, но плохо работает при силе ветра от 4 баллов. В таком случае применение разработанного подхода обладает более высокой эффективностью.

В результате исследования получена симуляционная модель поиска эффективных траекторий движения БПЛА. По результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод о достаточной эффективности выбранной модели, подхода и алгоритмов. Естественно, оператор БПЛА не может точно указать или даже предсказать место утечки метана, но предварительный анализ и ситуационное моделирование позволит использовать ресурс БПЛА с большей эффективностью. Количество учитываемых параметров по определению траектории движения может как увеличиться, так и уменьшиться по результатам масштабных симуляций и в последующем — натуральных экспериментов.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, траектория движения, лазерный локализатор утечек газа, симуляционная модель.

*Для цитирования:* Максудова А. В., Гавриленко А. В. Моделирование эффективных траекторий движения беспилотного летательного аппарата для обнаружения утечек на газопроводах. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):33–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-4.

## EFFICIENT PATHS FOR UAV-BASED GAS PIPELINE LEAK DETECTION

S. A. Maksudova<sup>а</sup>, A. V. Gavrilenko<sup>б</sup>

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

<sup>а</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3139-3770>, [maksofal20@mail.ru](mailto:maksofal20@mail.ru)

<sup>б</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1837-5698>, [gavrilenko.anna.v@gmail.com](mailto:gavrilenko.anna.v@gmail.com)

*Abstract:* the study proposes an approach to generating unmanned aerial vehicle (UAV) paths for gas pipeline leak detection applications. The new approach uses a UAV simulation tool to optimize the search for methane leaks in pipelines. The goal is to find optimal UAV paths that maximize the probability of leak detection in the given climatic conditions.

The simulation results show a significant difference in leak detection and gas cloud localization probabilities achieved with the proposed flight path and a pipeline-parallel UAV flight path. Under 0...2 force wind, the UAV path parallel to the pipeline gives sufficient efficiency, but it is a poor strategy in wind forces of 4 points or more. In this case, the proposed approach is more efficient.

We created a simulation model for finding efficient UAV flight paths. The computational experiments confirmed the proposed model, approach and algorithms are sufficiently efficient. The UAV operator is

unable to provide or even guess the exact location of a methane leak. Still, preliminary analysis and situation modeling improve UAV utilization. The number of variables considered when generating a flight path can either increase or decrease based on the results of large-scale simulations and field experiments.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, flight path, laser gas leakage detector, simulation model.

*Cite this article:* Maksudova S. A., Gavrilenko A. V. Efficient Paths for UAV-Based Gas Pipeline Leak Detection. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):33–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-4.

## Введение

Природный газ метан является одним из основных видов топлива. При этом ключевым методом доставки к потребителю является газопровод. Любой газопровод должен обеспечивать надежную работу при транспортировке газа. Внештатные ситуации на линейных объектах могут нанести серьезный ущерб экологии из-за загрязнения окружающей среды, экономике — из-за потерь продукта, серьезные аварии могут привести к людским потерям.

В статье [1] представлен ряд методов обнаружения мест утечек газа на магистральных трубопроводах. Рассмотренные методы имеют ряд недостатков, которые связаны с временными затратами на обнаружение и невозможностью использования в отдаленных и труднодоступных местах. Применение беспилотных летательных аппаратов для обнаружения утечек метана на линейных газопроводах с использованием лазерных локаторов утечек газов может решить данную проблему.

Автор в статье [2] рассматривает вопрос применения БПЛА для оперативного получения информации о состоянии магистральных трубопроводов. В результате исследования делается вывод, что использование БПЛА даст возможность сэкономить время для обнаружения утечек. Рабочие службы смогут своевременно локализовать место аварии и предотвратить потенциальную техногенную катастрофу.

Эффективность применения БПЛА не вызывает сомнения, но при этом построение траектории полета БПЛА и возможность совершения им облета зависит от метеорологических показателей. Построение эффективной траектории полета — нетривиальная задача, которая может быть разбита на два этапа:

1. Построение траектории для первичного обнаружения утечки.
2. Локализация утечки с целью определения потенциально опасной зоны и предположительного центра области утечки.

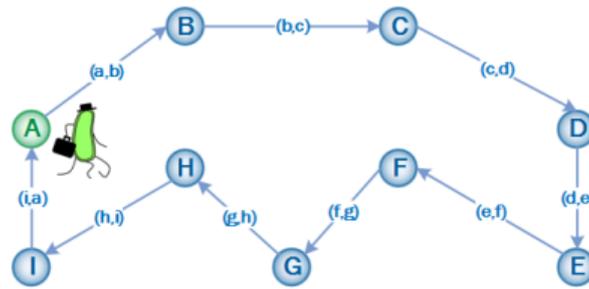
В работе рассматривается БПЛА, содержащий в схеме управляющей системы лазерный локатор. Фазовый детектор в системе считывает, как луч отклоняется и рассеивается, и выдает значения в зависимости от результатов. Сделаем предположения, что лазерный локатор полностью повторяет траекторию движения летательного аппарата, частотная модуляция детектора 7 кГц [3]. Для возможности оценивания эффективности разработанного подхода для поиска траекторий движения БПЛА при решении задачи обнаружения утечек на линейных газопроводах создана симуляционная модель.

## Построение траектории для первичного обнаружения утечки метана

В результате изучения задачи выяснилось, что выбирать среди различных вариантов траекторий одну не совсем оптимально, так как вероятность обнаружения утечки будет невысокой из-за сложного поведения метана при изменении метеоусловий. Следовательно, необходимо расставить точки маршрута в пространстве так, чтобы при построении траектории выстраивался наиболее оптимальный маршрут движения БПЛА с учетом направления и скорости ветра в текущий момент времени.

Одной из самых известных задач, заключающейся в поиске оптимального маршрута, является *задача коммивояжера* (рис. 1). В классической постановке задачи коммивояжеру необходимо найти кратчайший маршрут, начинающийся в стартовом городе и заканчивающийся в нем.

В связи с тем, что газопровод имеет большую протяженность и, как следствие, потенциально большое количество точек облета, в качестве метода решения задачи коммивояжера был выбран поисковый метод — генетический алгоритм (ГА). В результате тестирования методов, представленных в [4] на произвольных наборах исходных данных, выяснилось, что наиболее эффективен ГА и эвристический метод ближайшего соседа. При этом эвристические методы — бесспорные лидеры по быстродействию, но поисковые обеспечивают более высокое качество решений [5]. Обобщенная схема работы генетического алгоритма приведена на рис. 2. Данный алгоритм был применен при построении



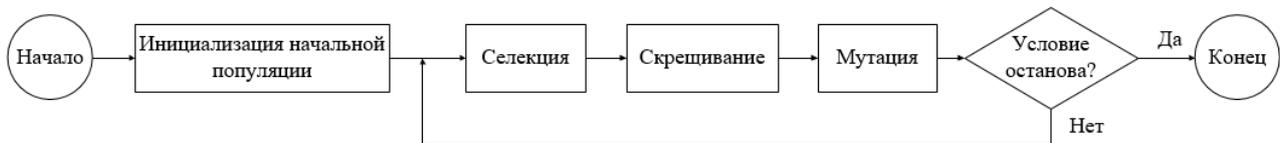
**Рис. 1.** Пример представления задачи коммивояжера

траектории для первичного облета БПЛА. Работа алгоритма начинается с генерации случайной начальной популяции — набор координат  $\{x, y\}$ . В нашем подходе в зависимости от направления и скорости ветра диапазон координат существенно меняется.

На втором этапе — селекция популяции. Происходит выбор тех комбинаций особей (траекторий), состоящий из набора координат, которые удовлетворяют решаемой задаче и будут участвовать в создании потомков (траекторий). Каждая особь в популяции сортируется по возрастанию, от самого короткого пути до самого длинного. Традиционно проводится селекция половины особей. Вторая половина отсеивается, и на место «отбракованных» особей добавляются новые [6].

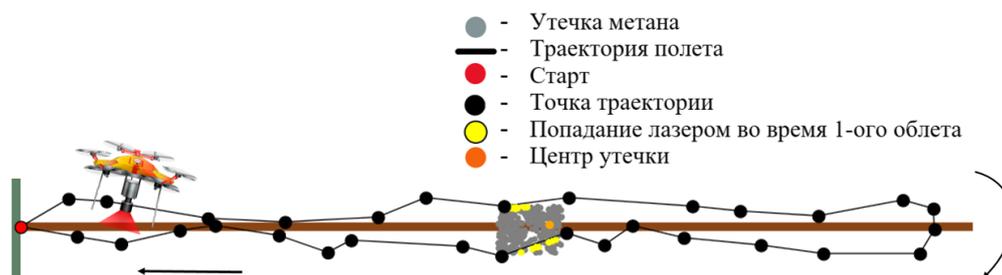
Третий этап — скрещивание двух или более индивидов (траекторий) с целью воспроизведения потомства и поиска новых решений [7].

Далее процесс мутации. Представляет собой небольшое случайное изменение в генотипе решения (в траектории).



**Рис. 2.** Обобщенная схема работы генетического алгоритма

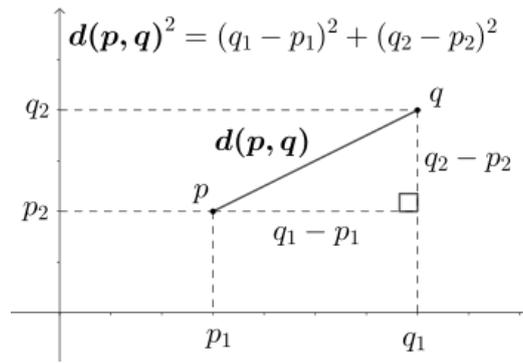
Процесс построения траектории пользователь может отслеживать в реальном времени и останавливать в любой момент. Сам алгоритм работает бесконечно или заданное время  $t$ . Пример работы алгоритма представлен на рисунке 3.



**Рис. 3.** Пример построения траектории БПЛА с обнаружением утечки локатором

В характеристиках БПЛА есть важный параметр — длина пути, которую может пролететь БПЛА при максимальной зарядке аккумулятора. Следовательно, необходимо учитывать длину пути БПЛА при облете территорий для своевременного возвращения БПЛА на базу для зарядки. Подход для расчета оценочной длины траектории представлен ниже.

Рассчитывается общее расстояние каждой особи из популяции будет с помощью евклидовой метрики. Евклидова метрика (евклидово расстояние) — расстояние между двумя точками евклидова пространства, вычисляемое по теореме Пифагора (рис. 4).



**Рис. 4.** Использование теоремы Пифагора для вычисления евклидова расстояния на плоскости

Для точек  $p = (p_1, \dots, p_n)$  и  $q = (q_1, \dots, q_n)$  евклидово расстояние определяется следующим образом:

$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - q_k)^2}, \quad (1)$$

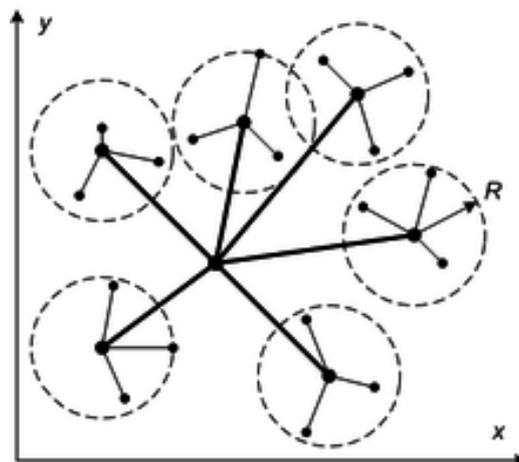
где  $d(p, q)$  — евклидово расстояние;  $p = (p_1, \dots, p_n)$  и  $q = (q_1, \dots, q_n)$  — координаты точек.

#### Локализация утечки с целью определения потенциально опасной зоны и предположительного центра области утечки

В симуляционной модели, кроме координат обнаружения метана при облете трубопровода, формируется предполагаемое облако утечки метана. Задача БПЛА — это не просто облет трубопровода, а фактически обнаружение утечки. Источник утечки может быть задан вручную или случайным образом. В зависимости от заданных параметров интенсивности утечки (в условных единицах) в модели создается облако метана, которое меняет форму в зависимости от силы и направления ветра. После облета местности по траектории, заданной с помощью алгоритма коммивояжера (первый облет местности), необходимо определить данную область, в которой образовалась утечка. Для этого необходимо изучить зону утечки подробнее, запустить вторую разведку.

В первом облете была выполнена начальная разведка пространства (местности) с целью определения наиболее перспективных точек. Для данной задачи перспективные точки — это координаты траектории движения БПЛА, вблизи которых была зафиксирована утечка после первого облета местности. В окрестностях выбранных точек производится локальная разведка в пределах заданного радиуса  $R$  с целью уточнения решения и локализации утечки (рис. 5).

В качестве наиболее перспективного метода локализации утечки применен роевой алгоритм, в частности, пчелиный. Общая стратегия представлена на рис. 5.

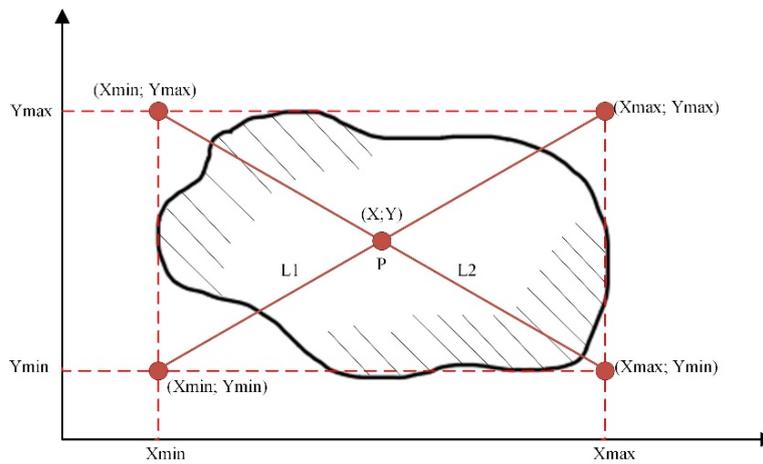


**Рис. 5.** Стратегия разведки

Наиболее перспективными точками для локализации утечки на втором этапе выбираются точки траектории, предшествующие обнаружению утечки и следующие за обнаруженными точками утечки. Величины радиусов (рис. 5) зависят от силы ветра. Графически пример результата работы алгоритма представлен на рис. 7.

После второго облета местности с помощью алгоритма пчелиной колонии становятся известны уточненные координаты задымления метаном. С помощью найденных координат можно определить приблизительный центр утечки. Центр утечки может не находиться на самом трубопроводе, так как ветер может значительно перемещать облако метана, но это позволяет оценить масштаб аварии. Будем использовать следующую упрощенную схему, достаточную для оценки центра утечки. Для этого из множества координат утечки можно найти минимальные и максимальные координаты по оси абсцисс и ординат:  $X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max}$ .

На рис. 6 показано пересечение двух прямых на плоскости, где прямая  $L_1$  определена двумя точками  $(x_1 = X_{min}, y_1 = Y_{min})$  и  $(x_2 = X_{max}, y_2 = Y_{max})$ , а прямая  $L_2$  –  $(x_3 = X_{max}, y_3 = Y_{min})$  и  $(x_4 = X_{min}, y_4 = Y_{max})$ .



**Рис. 6.** Облако утечки с зафиксированными координатами

Пересечение  $P$  прямых  $L_1$  и  $L_2$  можно вычислить следующим образом:

$$(P_x, P_y) = \left( \frac{(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2) \cdot (x_3 - x_4) - (x_1 - x_2) \cdot (x_3 \cdot y_4 - y_3 \cdot x_4)}{(x_1 - x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 - x_4)}, \frac{(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 \cdot y_4 - y_3 \cdot x_4)}{(x_1 - x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 - x_4)} \right), \quad (2)$$

где  $x, y$  – координаты точек прямой,  $P_x, P_y$  – координата пересечения прямых.

Далее, для того чтобы определить область (радиус) задымления, необходимо найти евклидово расстояние с помощью уравнения (1) по оси абсцисс  $S_x$  и ординат  $S_y$ :

$$S_x = \frac{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}}{2}, \quad (3)$$

$$S_y = \frac{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}}{2}. \quad (4)$$

После второго облета местности и последующего анализа данных получаем центр с координатами  $(P_x, P_y)$  и радиус области исследования  $S_x$  и  $S_y$ .

Пример работы пчелиного алгоритма и последующих вычислений представлен на рисунке 7.

По итогам исследования с применением симуляционного моделирования были получены следующие результаты статистики первого (рис. 8, 9) и второго (рис. 11, 12) облетов.

На диаграмме (рис. 8) синим цветом обозначено среднее количество срабатываний лазерного локатора за один облет, всего облетов – оранжевым цветом, количество облетов, в которых утечка была обнаружена, – серым цветом. На диаграмме можно видеть изменение количества удачных облетов в зависимости от силы ветра.



Рис. 7. Результат построения зоны облета БПЛА и выделения области утечки

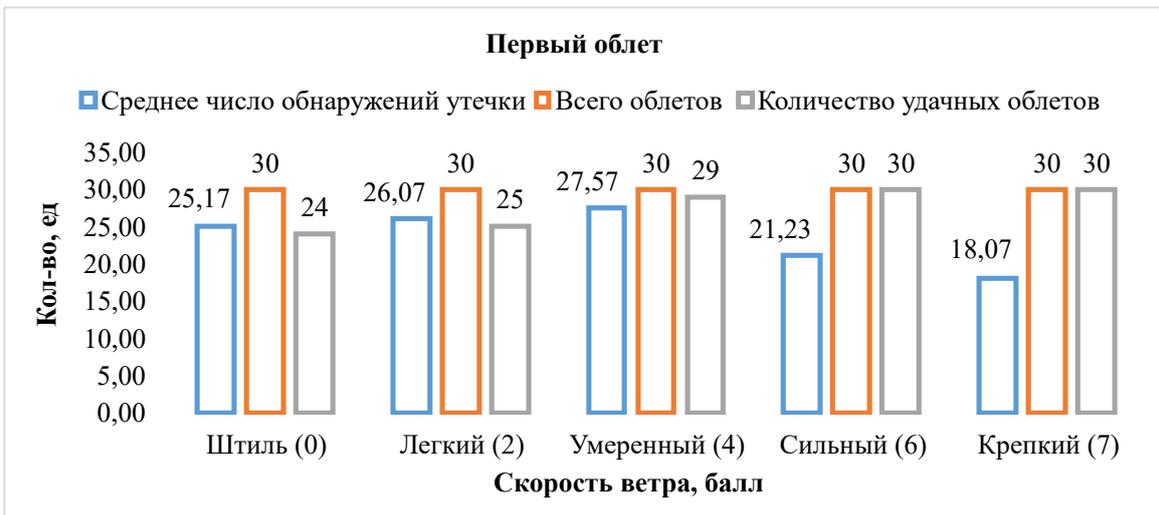


Рис. 8. Диаграмма результатов первого облета на основе разработанного подхода

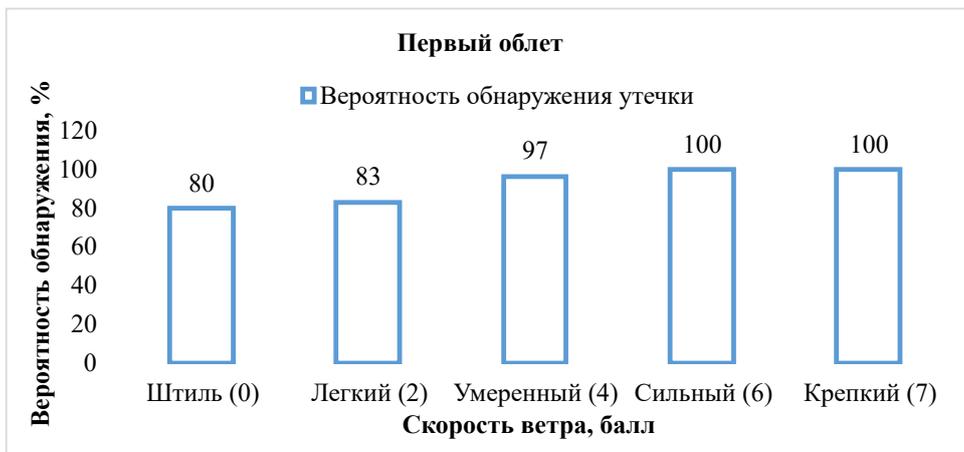


Рис. 9. Диаграмма вероятности обнаружения утечек при первом облете на основе разработанного подхода

По результатам симуляции первого облета можно отметить, что при показателе скорости ветра от 4 до 7 баллов вероятность обнаружения утечки газа повышается в связи с увеличением площади распространения метана, в отличие от скорости ветра от 0 до 2 баллов.

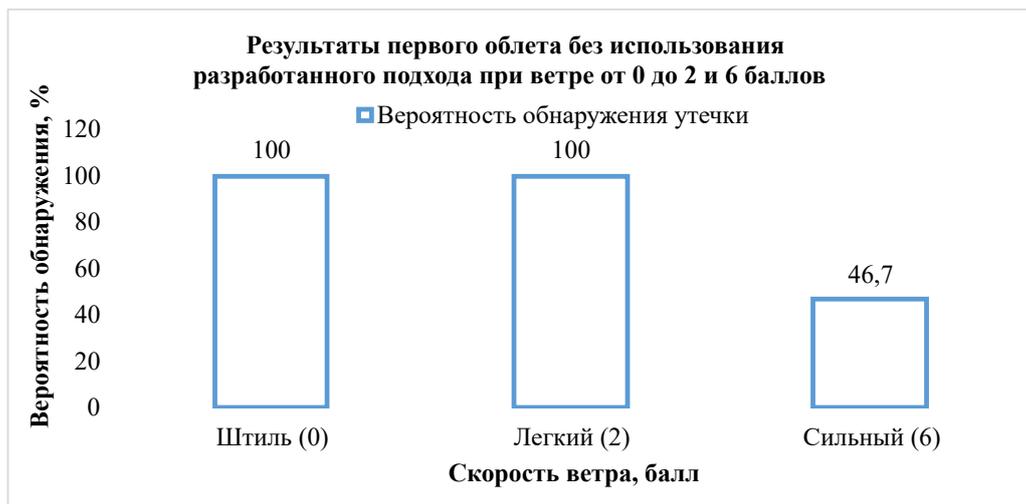
Для сравнения рассмотрим вариант, при котором БПЛА движется строго параллельно трубопроводу.

Таблица

*Результаты первого облета при силе ветра 0 баллов, от 0 до 2 баллов и 6 баллов (движение параллельно трубопроводу)*

Скорость ветра	Среднее число обнаружений утечки	Всего облетов	Количество удачных облетов	Вероятность обнаружения утечки
Штиль (0)	30,03	30	30	100
Легкий (2)	19,33	30	30	100
Сильный (6)	5,06	30	14	46,7

В таблице представлены показатели для описанной выше модели. Первые три показателя (среднее число обнаружений утечки, всего облетов, количество удачных облетов) аналогичны показателям рисунка 8, а последний — рисунка 9.

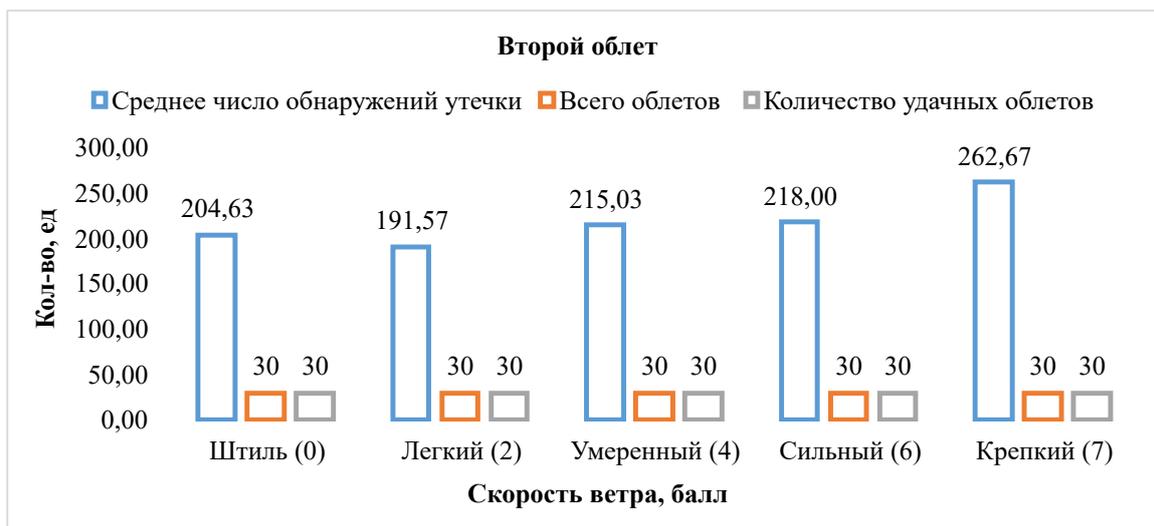


**Рис. 10.** Диаграмма вероятности обнаружения утечек при первом облете при движении БПЛА параллельно трубопроводу

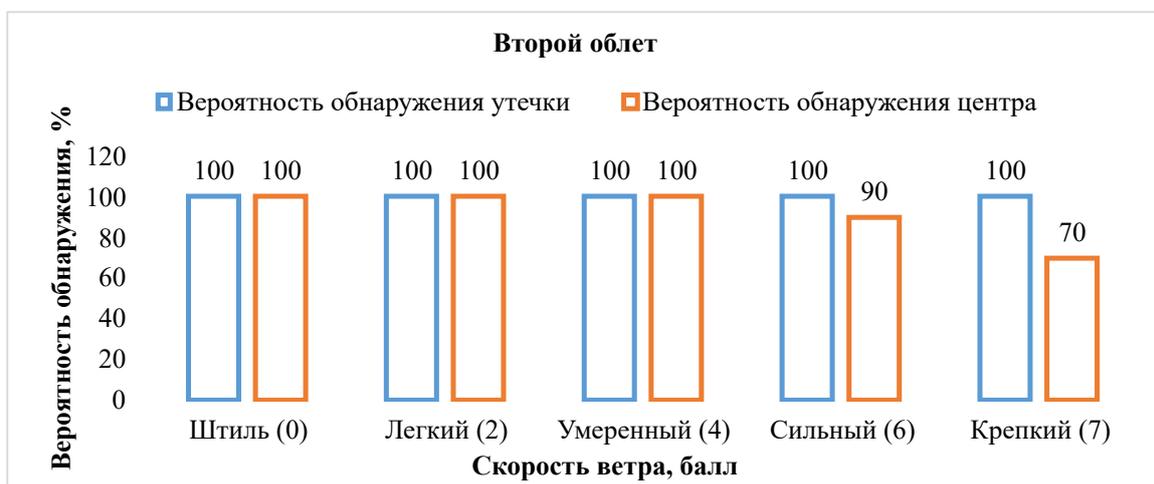
Из приведенной статистики можно сделать вывод, что вероятность попадания лазером в облако утечки при отсутствии ветра либо при малой скорости ветра (до 2 баллов), если траектория полета БПЛА строится строго над траекторией расположения линейного газопровода, является более высокой в отличие от случая, когда используем рассмотренный в работе подход к определению эффективных траекторий для БПЛА в целях обнаружения утечек на газопроводах. Но для случая с достаточно сильным ветром (6 баллов) разработанный подход показывает большую эффективность, что следует из полученной вероятности 46,7 % при облете параллельно газопроводу (рис. 10) и вероятности 100 % при использовании разработанного подхода (рис. 9).

Рисунок 11 показывает, что использование пчелиного алгоритма при втором облете значительно повышает количество срабатываний лазерного детектора БПЛА. И это приводит к закономерному итогу (рис. 12).

Использование пчелиного алгоритма, который применяется на этапе локализации утечки, дало лучшие результаты по среднему числу обнаружений концентрации метана. С повышением скорости ветра увеличивается и расстояние от центра образования утечки на газопровode до центра облака метана. Вероятность того, что центр области утечки метана, рассчитанный с помощью представленного



**Рис. 11.** Диаграмма результатов облета при локализации области утечки с использованием пчелиного алгоритма



**Рис. 12.** Диаграмма вероятности обнаружения области утечки и центра утечки

подхода, попадет в фактический центр ее образования, начинает понижаться при скорости ветра от 6 и более баллов, хотя и остается приемлемой.

Текущие результаты симуляционного моделирования показывают существенное различие вероятности обнаружения утечки с последующей локализацией облака утечки при использовании разработанного подхода от вероятности обнаружения утечки при подходе с параллельным облетом газопровода. Можно отметить, что для метеоусловий с силой ветра 0–2 балла параллельное движение БПЛА относительно трубопровода показывает достаточную эффективность, но плохо работает при силе ветра от 4 баллов. В таком случае применение разработанного подхода обладает более высокой эффективностью.

В результате получена симуляционная модель поиска эффективных траекторий движения БПЛА. По результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод о достаточной эффективности выбранной модели, подхода и алгоритмов. Естественно, оператор БПЛА не может точно указать или даже предсказать место утечки метана, но предварительный анализ и ситуационное моделирование позволит использовать ресурс БПЛА с большей эффективностью. Количество учитываемых параметров по определению траектории движения может как увеличиться, так и уменьшиться по результатам масштабных симуляций и в последующем — натурных экспериментов [8].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чупин В. Р., Гаськов Е. В., Майзель Д. И. Методы обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2012;2:123–127. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-obnaruzheniya-utechek-gaza-iz-magistralnyh-truboprovodov/viewer>.
2. Айроян З. А., Коркишко О. А., Сухарев Г. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов с помощью беспилотных летательных аппаратов. *Инженерный вестник Дона*. 2016;4. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-magistralnyh-nefteprovodov-s-pomoschyu-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/viewer>.
3. Плюснин И. И., Бушмелева К. И., Майер И. В. Система диагностирования дефектов магистральных газопроводов с использованием ГИС-технологий. *Современные наукоемкие технологии*. 2005;8:46–48.
4. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А. *Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем* / Под ред. А. В. Колесникова. М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с. Режим доступа: [http://www.raai.org/library/books/kolesnikov/kommivoyazher-2011\\_kolesnikov.pdf](http://www.raai.org/library/books/kolesnikov/kommivoyazher-2011_kolesnikov.pdf).
5. Борознов В. О. Исследование решения задачи коммивояжера. *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2009;2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-resheniya-zadachi-kommivoyazhera/viewer>.
6. Долженко А. М. Уточнение решений задачи коммивояжера генетическими мутациями. *Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2013;2:9–15. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/utochnenie-resheniy-zadachi-kommivoyazhera-geneticheskimi-mutatsiyami/viewer>.
7. Рудова И. Ш. Исследование влияния сильных мутаций при решении задачи коммивояжера модифицированной моделью Голдберга. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2017;3:140–148. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-silnyh-mutatsiy-pri-reshenii-zadachi-kommivoyazhera-modifitsirovannoy-modelyu-goldberga/viewer>.
8. Gavrilenko A. V., Bushmeleva K. I., Gavrilenko M. T. A New Approach to Aircraft Flight Technology for Detecting Gas Leakage from Pipelines. *Information Innovative Technologies: Materials of the International Scientific-Practical Conference* / Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I. A. M. Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. P. 286–292.