

УДК 004.942

**МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗРЕШЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ АЭРОДРОМА****Е.А. Гончаренко, А.С. Попов (Москва)****Введение**

Весной 2024 года Европейская организация по безопасности воздушной навигации (EUROCONTROL) представила обновленный прогноз интенсивности воздушного движения на период 2024–2030 г. [1]. Несмотря на резкое снижение количества полетов, вызванное вспышкой COVID-19 в конце 2019 – начале 2020 г., уже с середины-конца 2020 г. наблюдается постепенное восстановление объёмов авиаперевозок. Согласно прогнозу, в 2025 г. количество полетов достигнет допандемического уровня (2019 г.), а в последующий период ежегодный прирост составит около 0,3 млн. рейсов. В результате к 2030 г. общая интенсивность воздушного движения превысит 12 млн. рейсов в год.

Аэропорт является узким «горлышком» в части пропускной способности всей системы организации воздушного движения, обеспечивая прибытие и отправление воздушных судов (ВС). Разрешение проблем, возникающих в загруженных аэропортах мира, стало предметом серьезной озабоченности международных организаций гражданской авиации.

Другим важным аспектом является изменения в структуре аэродрома. Оценка воздействия изменений в инфраструктуре (например, ввод в эксплуатацию новой полосы, временное закрытие перронов или рулежных дорожек (РД)) на реализацию планов полётов представляет собой нетривиальную задачу.

Для этих целей в ФАУ «ГосНИИАС» было разработано программное средство «Имитационная модель аэродрома» (СимАП), которое реализует ускоренное компьютерное моделирование операций на поверхности аэродрома для сбора и анализа показателей пропускной способности, безопасности и эффективности выполнения операций на его поверхности.

Программное средство «Имитационная модель аэродрома» (СимАП)

На рис. 1 представлен интерфейс программного средства (ПС) «СимАП», где в качестве примера изображена цифровая модель аэродрома Домодедово.

В число моделируемых операций входят:

- назначение мест стоянок с использованием оптимизационных алгоритмов;
- построение и назначение маршрутов руления от мест стоянки до исполнительного старта и от точки схода с взлетно-посадочной полосы (ВПП) до места стоянки;
- эксплуатационные операции, включая запуск двигателей, противообледенительную обработку, выталкивание хвостом вперед и др.;
- управление движением ВС, включая обнаружение и разрешение потенциальных конфликтных ситуаций;
- формирование очереди на предварительном старте;
- управление очередью прибывающих и вылетающих с учетом норм безопасности и категорий турбулентности ВС.



Рис. 1. Основное окно ПС «СимАП»

Общая схема программного средства представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема ПС

Основными исходными данными являются картографическая база данных аэродрома (AMDB – Aerodrome Mapping Database), операционная база данных аэродрома (AODB – Airport Operational Database) и настройки сеанса моделирования.

Сама имитационная модель состоит из следующих компонентов:

- модель управления движением;
- модель обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС);
- модель построения маршрутов;
- модель движения.

Данная модель имитирует функции множества диспетчеров: перрона (преимущественно на крупных аэродромах), руления и старта/посадки. В целом модель обнаружения и разрешения ПКС имитирует действия диспетчеров в части регулирования при рулении ВС и обеспечения безопасных интервалов от места стоянки до исполнительного старта при вылете и от съезда с ВПП до места стоянки при прилёте.

Модель обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций

Модель обнаруживает ПКС следующих типов [2]:

- «Догон на РД» – попадание одного из ВС в зону безопасности другого на участках маршрутов по поверхности аэродрома в зонах перронов и РД, при котором один ВС догоняет другое;
- «Пересечение на РД» – попадание одного из ВС в зону безопасности другого на пересекающихся участках маршрутов ВС в зонах перронов и РД;
- «Встречный курс на РД» – попадание одного из ВС в зону безопасности другого на участках маршрутов ВС по поверхности аэродрома в зонах перронов и РД, при движении по которым рассматриваемые ВС движутся навстречу друг другу;
- «Пересечение ВПП» – ситуация, при которой одно из ВС совершает разбег или взлёт, либо торможение или посадку на ВПП, находясь при этом на расстоянии не более заданного от торца ВПП, а второе ВС пересекает ту же самую ВПП;
- «Нарушение безопасности в зоне ВПП» – ситуация, при которой одно из ВС совершает разбег или взлёт, либо торможение или посадку на ВПП, а второе ВС въезжает в зону той же самой ВПП;
- «Нарушение норм на ВПП» – нарушение временных интервалов между вылетами, прилётами или прилётами и вылетами, совершаемыми с одной или зависимых ВПП;
- «Конфликт на исполнительном старте» – ситуация, при которой два ВС одновременно занимают исполнительный старт;
- «Конфликт на предварительном старте» – ситуация, при которой два ВС одновременно занимают один и тот же предварительный старт.

Поиск конфликтных ситуаций на аэродроме происходит в заданном временном интервале и выбирается самый ранний по времени конфликт. На рис. 3-9 продемонстрированы примеры ПКС, обнаруживаемые моделью.

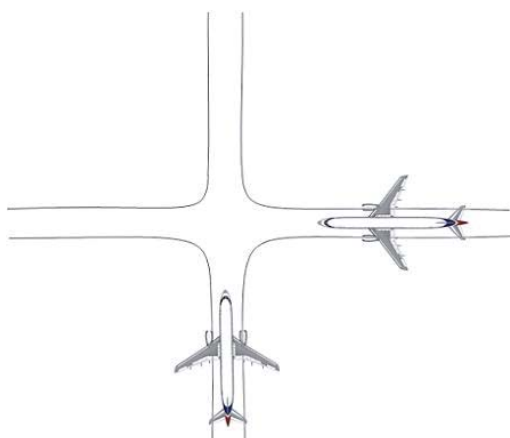


Рис. 3. Пример ПКС типа «Пересечение на РД»

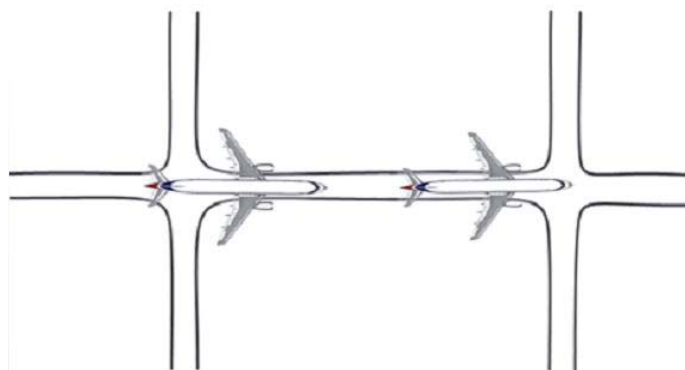


Рис. 4. Пример ПКС типа «Догон на РД»

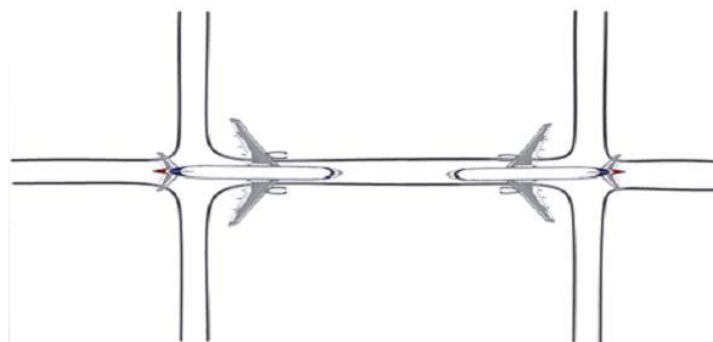


Рис. 5. Пример ПКС типа «Встречный курс»

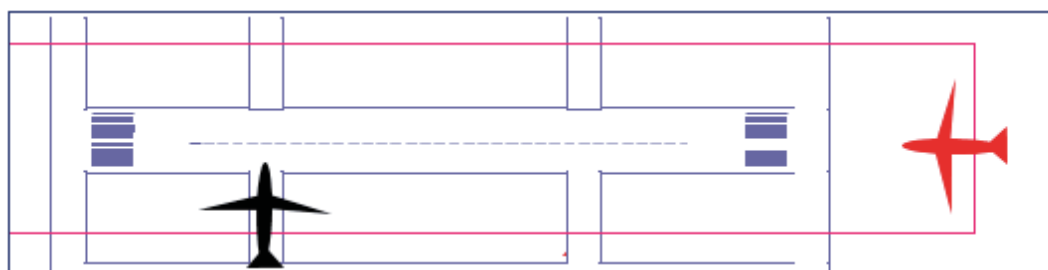


Рис. 6. Пример ПКС типов «Пересечение ВПП»
и «Нарушение безопасности в зоне ВПП»

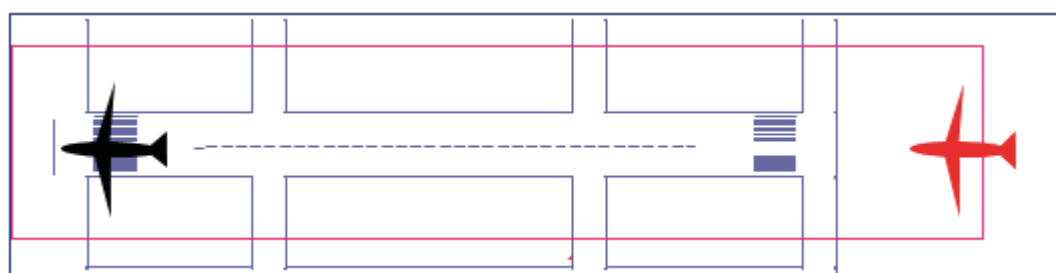


Рис.7. Пример ПКС типа «Нарушение норм на ВПП»

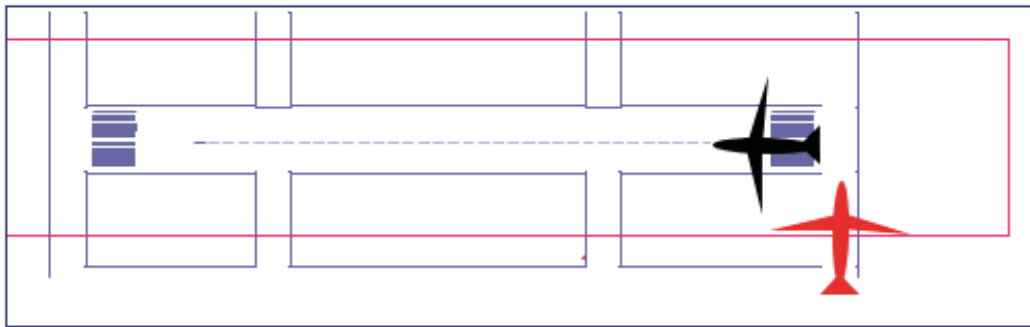


Рис. 8. Пример ПКС типа «Конфликт на исполнительном старте»

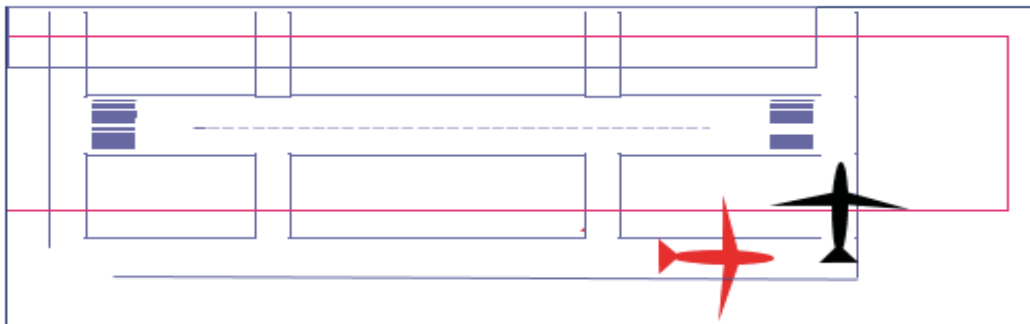


Рисунок 9. Пример ПКС типа «Конфликт на предварительном старте».

Модель регулирования потенциальных конфликтных ситуаций

После обнаружения ПКС необходимо произвести задержку одного из пары рейсов на определенное время с использованием одной из моделируемых мер регулирования:

- задержка на месте стоянки (пример представлен на рис. 10);

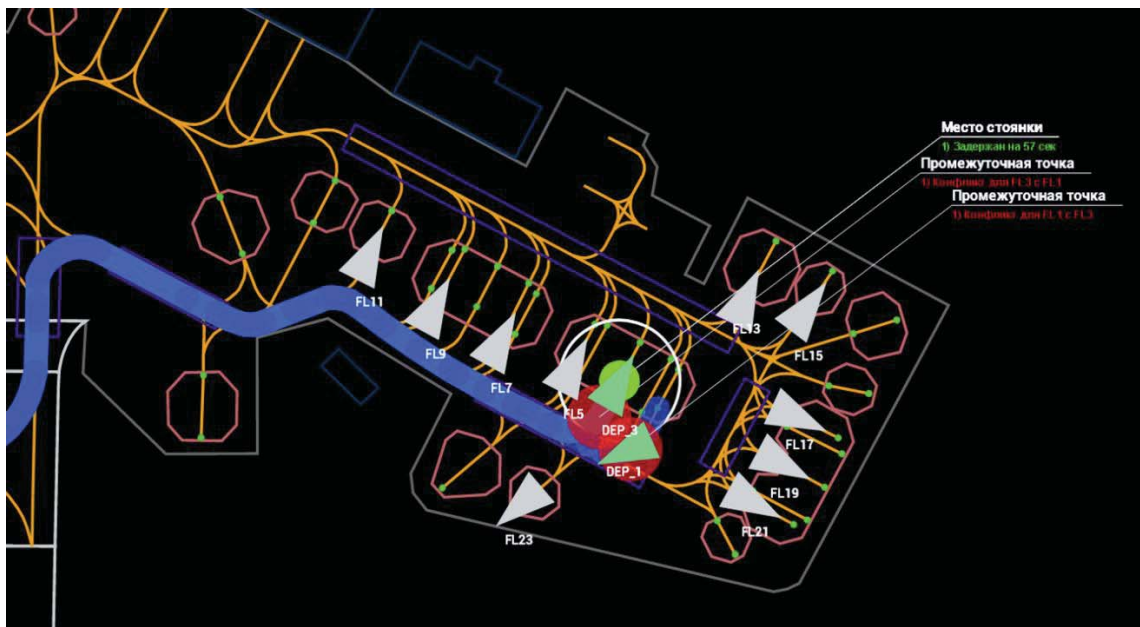


Рис. 10. Пример задержки временем на месте стоянки

На рис. 10 красным цветом обозначены местоположения ВС в момент ПКС, зеленым цветом отмечена точка остановки ВС для предотвращения конфликта. Каждая точка содержит двухуровневую подпись: в верхней части указано местоположение точки, в нижней – детали конфликтной ситуации.

- задержка в точке на РД (пример продемонстрирован на рис. 11);

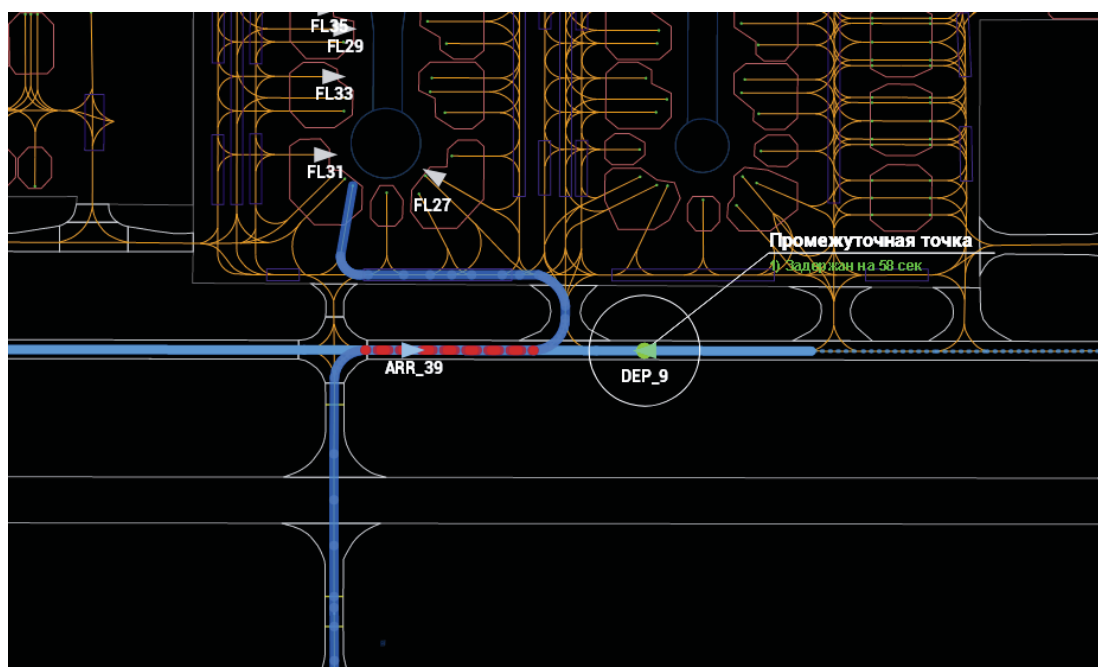


Рис. 11. Пример задержки временем на РД

На рис. 11 красными пунктирными линиями обозначен участок совпадения маршрутов двух воздушных судов, где была обнаружена ПКС. Точка разрешения конфликта (место задержки) обозначена зеленым цветом и содержит аннотацию с местоположением и расчетным временем задержки.

- задержка скоростью (пример изображен на рис. 12).

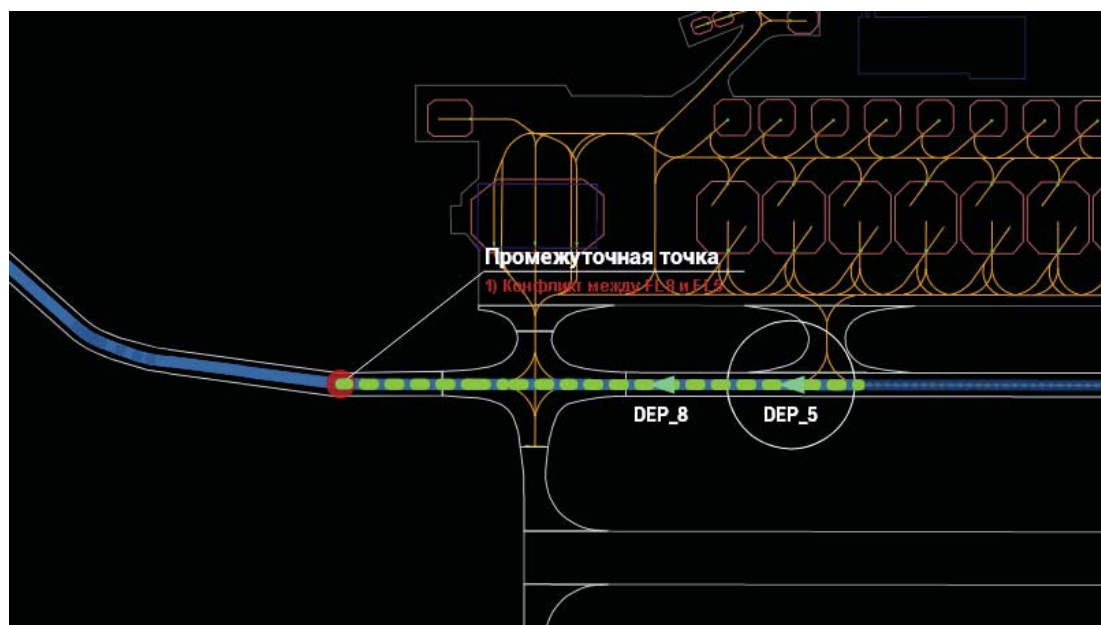


Рис. 12. Пример задержки скоростью на РД

На рис. 12 красной точкой изображено место ПКС для двух ВС с информацией о местоположении и конфликте. Зеленой пунктирной линией продемонстрирован участок маршрута, на котором ВС сбавит скорость для избегания догона впереди идущего ВС.

Повышение производительности модели

Модель реализует событийный подход и реагирует на событие начала движения ВС – а именно, касание ВПП при посадке или выезд с МС при рулении на вылет. В разработанном ранее комплексе имитационного моделирования системы организации воздушного движения (КИМ ОрВД) [3-5] применялся дискретный подход, при котором расчет модели запускался с фиксированным интервалом в 30 сек. Для данного подхода использовалось текущее модельное время, которое использовалось в качестве входного параметра. Это приводило к падению производительности модели в целом из-за слишком частых вызовов при отсутствии изменений в ситуации на аэродроме. После применения предложенного метода модель производит поиск конфликтов и их разрешение после срабатывания события на начало руления ВС по поверхности аэродрома. Для данного метода текущее время в качестве входного параметра не учитывается.

Дальнейшее выявление и урегулирование конфликтов происходит в определенном временном промежутке, который определяется как времена начала и завершения движения активируемого рейса. Из оперативного графика (рейсы, время активации которых произойдет в течение 20 мин от рассматриваемого времени) выбираются рейсы, входящие в установленный интервал, и для каждого выбирается сегмент маршрута, попадающий в этот временной диапазон. Описанный процесс подготовки данных иллюстрирован на рис. 13.

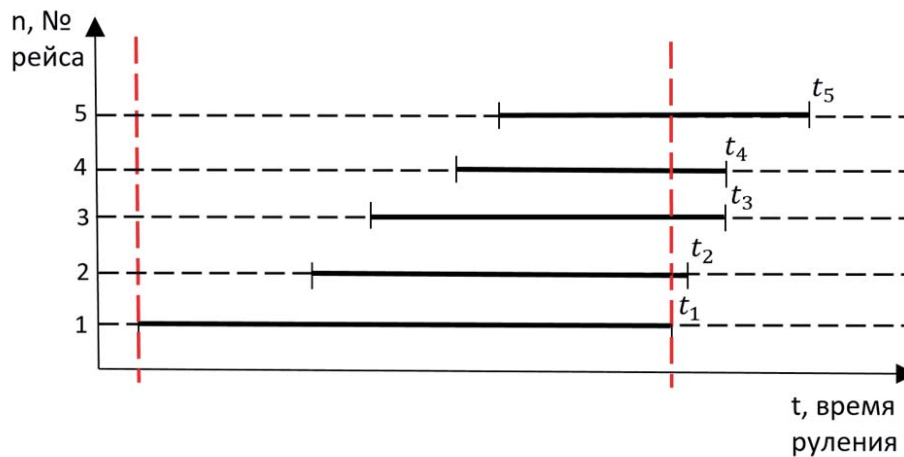


Рис. 13. Процесс подготовки данных для обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций

Представленный подход также ускоряет работу модели, так как выборка данных позволяет обеспечить бесконфликтное движение для активируемого рейса. Остальные рейсы, которые находятся в оперативном расписании будут до конца отрегулированы во время последующих запусков модели.

Также для ускорения производится сохранение (кэширование) результатов расчетов между вызовами функции обеспечения безопасного эшелонирования в условиях окружающего трафика: если между парой рейсов не было обнаружено конфликтов, то информация об этом сохраняется. На последующих итерациях, при условии отсутствия изменения в рейсах, между этими парами не будет производиться поиск конфликтных ситуаций. После разрешения конфликта для всех пар с задержанным рейсом будет производиться повторный поиск конфликтов, так как ситуация на аэродроме поменяется из-за произведения задержки одной из мер регулирования.

Модель обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций, представленная на рис. 14 в виде блок-схемы, работает до тех пор, пока не будут разрешены все ПКС на поверхности аэродрома, либо пока не будет превышено заданное пользователем максимальное число итераций. Это число задается для того, чтобы определить условие прерывания выполнения функции в случаях, когда решение не может быть найдено за конечное время, что сильно снижает общую производительность модели.

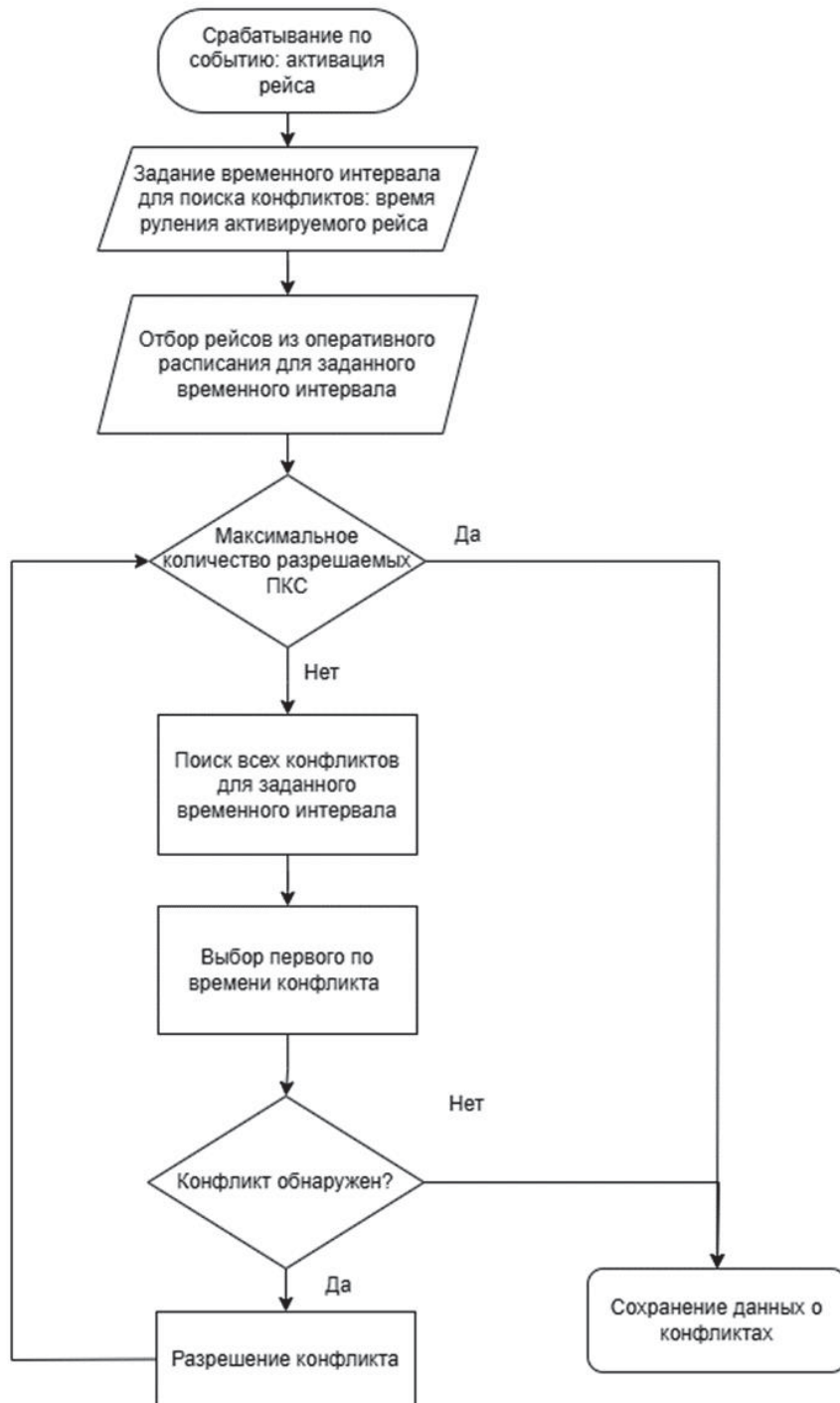


Рис. 14. Блок-схема алгоритма обнаружения и разрешения ПКС

Результаты

Были разработаны методы ускорения работы модели и алгоритмы для обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций на аэродроме, которые были реализованы с использованием интегрированной среды разработки (integrated development environment – IDE) Visual Studio 2022 на языке C#. Также было произведено внедрение в состав ПС «Имитационная модель аэродрома» (СимАП).

Была проведена апробация разработанной модели на аэродроме Шереметьево для 2500 рейсов за сутки. В табл. 1 представлены результаты работы ПС, в котором включена модель с использованием оптимизации временного поиска и без, для одинакового расписания:

Таблица 1. Время работы ПС

Без использования оптимизации временного поиска	С использования оптимизации временного поиска
3,5 мин	50 сек

Исследования показали 100% разрешение потенциальных конфликтных ситуаций в определенных условиях.

Заключение

Изменения в интенсивности воздушного движения или в структуре аэродрома влечёт за собой ряд серьёзных проблем, связанных, в частности, с загруженностью аэропортов. Своевременное информирование диспетчера о возможных и произошедших конфликтных ситуациях является важной технической задачей.

В рамках данной работы была рассмотрена модель обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций на поверхности аэродрома в составе программного средства «Имитационная модель аэродрома» (СимАП). Были рассмотрены следующие конфликтные ситуации:

- «Пересечение ВПП»;
- «Нарушение норм на ВПП»;
- «Конфликт на исполнительном старте»;
- «Конфликт на предварительном старте»;
- «Догон на РД»;
- «Нарушение безопасности в зоне ВПП»;
- «Пересечение на РД»;
- «Встречный курс на РД».

Также были рассмотрены несколько мер регулирования представленных ПКС:

- задержка скоростью;
- задержка в точке на месте стоянки;
- задержка в точке на РД.

В дальнейшем планируется реализация обнаружения новых типов ПКС и применения соответствующих мер регулирований. Также предполагается разработка алгоритмов для перестроения маршрутов в качестве одной из мер регулирований.

Литература

1. EUROCONTROL Forecast Update 2024-2030 | EUROCONTROL
2. **Попов А.С.** Методы, математические модели и комплекс программ для выбора структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования: дис. ... канд. техн. наук: 1.2.2. - МАИ, Москва, 2022. 168 с.
3. **Вишнякова Л.В., Вересов К.А., Зубкова И.Ф., Обухов Ю.В., Петрова А.В., Попов А.С., Сикачев В.Ю., Скавинская Д.В., Топин В.А.** Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения, Журнал «Полёт», 2021, №7. С. 22-37 (№1730, перечень ВАК от 29.03.2022 г.).
4. **Вишнякова Л.В., Дегтярев О.В., Попов А.С.** Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) // Всерос. науч. практич. конф. по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС). Труды конференции М., 2012, с.59-67.
5. **Вишнякова Л.В., Попов А.С., Сикачев В.Ю.** Имитационное моделирование системы организации воздушного движения // Седьмая всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015), Труды конференций, Т.1 Пленарные доклады – М.:ИПУ РАН, 2015. С.23-24.