

УДК 629.783

Т. В. Лабуткина, А. А. Котюк

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **МЕТОД «ОБЪЕМНОГО ПЛЕТЕНИЯ» ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ЗОН МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛИКОНФЛИКТОВ, РАССМАТРИВАЕМЫХ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧАХ**

Представлено аналіз підходів до моделювання гіпотетичних даних для дослідницьких задач, які потребують розгляду ситуацій механічних поліконфліктів орбітальних об'єктів. Ситуацією механічного поліконфлікту вважається одночасне зближення орбітального об'єкту більш ніж з одним орбітальними об'єктами на відстань, небезпечну з точки зору можливості зіткнень (при цьому орбітальні об'єкти, з якими відбувається його зближення, також можуть знаходитися на небезпечній відстані один від одного). Розроблений метод швидкої генерації гіпотетичних зон поліконфліктів, оснований на заповненні її для заданого моменту часу небезпечними ділянками траєкторій (ділянками, які знаходяться на небезпечній відстані відносно декількох інших ділянок, що входять до зони). Конфігурацією ділянок обирає дослідник. Запропоновано методіку аналізу генерованої зони поліконфлікту.

**Ключові слова:** механічний конфлікт орбітальних об'єктів, небезпечне зближення орбітальних об'єктів, механічний поліконфлікт орбітальних об'єктів, поліконфліктна зона в навколосемному просторі, метод генерації гіпотетичних даних для аналізу поліконфліктів.

Представлен анализ подходов к моделированию гипотетических данных для исследовательских задач, требующих рассмотрения ситуаций механических поликонфликтов орбитальных объектов. Под ситуацией механического поликонфликта понимается одновременное сближение орбитального объекта более чем с одним орбитальными объектами на расстояние, опасное с точки зрения возможности столкновения (при этом орбитальные объекты, с которыми происходит его сближение, также могут находиться на опасном расстоянии друг относительно друга). Разработан метод быстрой генерации гипотетической зоны поликонфликтов, основанный на заполнении ее для заданного момента времени опасными участками траекторий (участками, находящимися на опасном расстоянии относительно нескольких других участков, входящих в зону). Конфигурацию участков в зоне выбирает исследователь. Предложена методика анализа сгенерированной зоны поликонфликтов.

**Ключевые слова:** механический конфликт орбитальных объектов, опасное сближение орбитальных объектов, механический поликонфликт орбитальных объектов, поликонфликтная зона в околоземном космосе, метод генерации гипотетических данных для анализа поликонфликтов.

**Efficacy of various algorithms for calculation of Legendre polynomials of high orders is investigated. Convenience of their programming is estimated. An analysis of approaches to the modeling of hypothetical data for research problems that require the consideration of situations of mechanical poly-conflicts of orbital objects is presented. A mechanical conflict is a close simultaneous approach of an orbital object with more than one orbital objects to a distance that is dangerous from the point of view of the possibility of collisions (in this case the orbital objects with which it comes closer may also be at a dangerous distance from each**

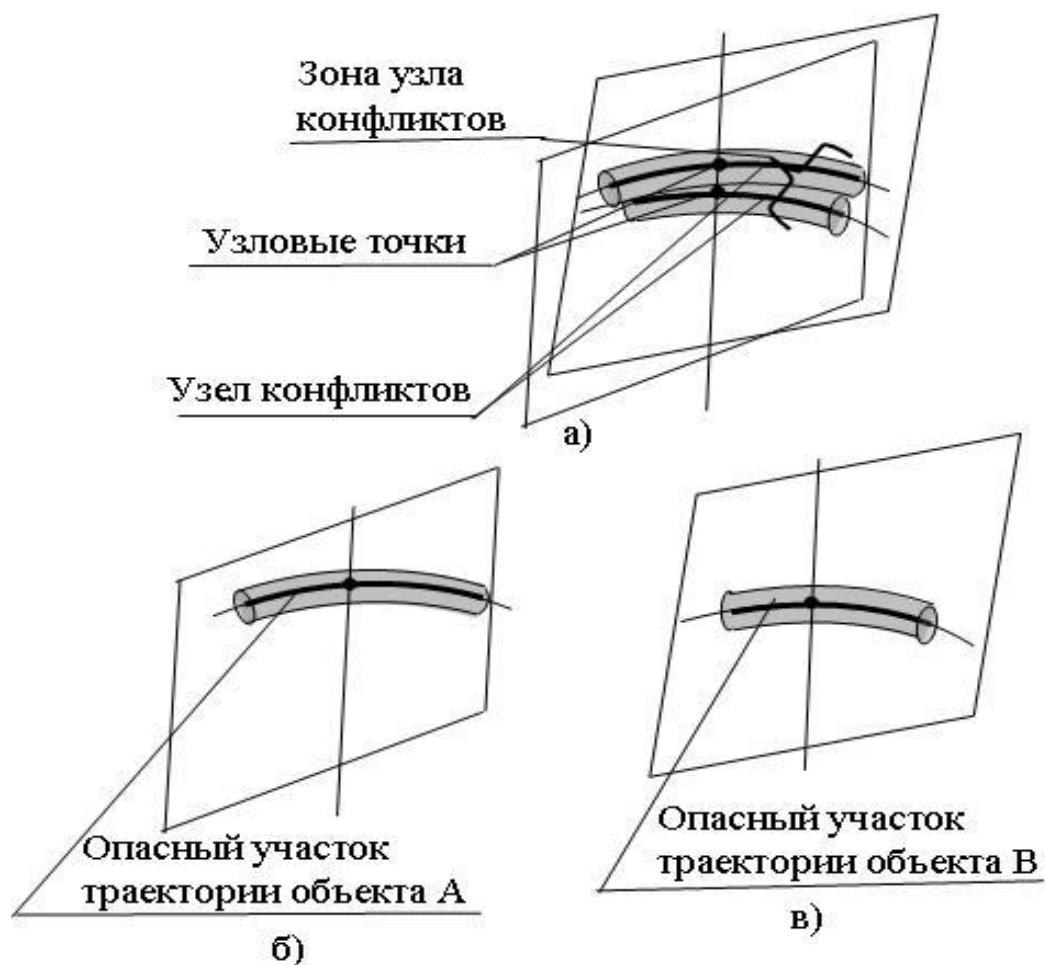
other). A method for rapid generation of a hypothetical zone of poly-conflicts, based on filling it with dangerous sections of trajectories for a given point in time (sections that are at a dangerous distance with a number of other sections of the zone) is developed. The configuration of the sections in the zone is selected by the researcher. The methodology for analyzing of generated polyconflicts zone is proposed.

**Keywords:** *mechanical conflict of orbital objects, dangerous approach of orbital objects, mechanical poly-conflict of orbital objects, poly-conflict zone in near-Earth space, method of generating hypothetical data for analysis of poly-conflicts.*

**Введение и обзор литературы.** Одна из острых проблем использования человечеством космического пространства – многочисленность множества орбитальных объектов в околоземном космосе и высокие темпы его роста [1]. Достаточно быстро увеличивается и число объектов космического мусора, и число космических аппаратов, которое пока составляет невысокий процент от всего орбитального множества, но с началом ввода в эксплуатацию многотысячных спутниковых систем (и при условии активизирующейся борьбе с космическим мусором) будет становиться все более значительной.

Многочисленность множества орбитальных объектов приводит к увеличению вероятности механических конфликтов (столкновений между ними). Расширим понятие ситуации механического конфликта, включив в него не только орбитальные столкновения, но и случаи опасных сближения орбитальных объектов (сближений на расчетных орбитах на опасные расстояния, при которых возможны их столкновения вследствие вероятных отклонений от расчетных положений). Увеличение множества объектов на орбитах Земли ведет к тому, что становятся возможными не только конфликтные, но и поликонфликтные ситуации, – одновременное сближение объекта на опасное расстояние с несколькими орбитальными объектами. В частном случае все или некоторое множество объектов такой группы объектов сближения (поликонфликтной группы объектов) могут находиться на опасном расстоянии друг относительно друга.

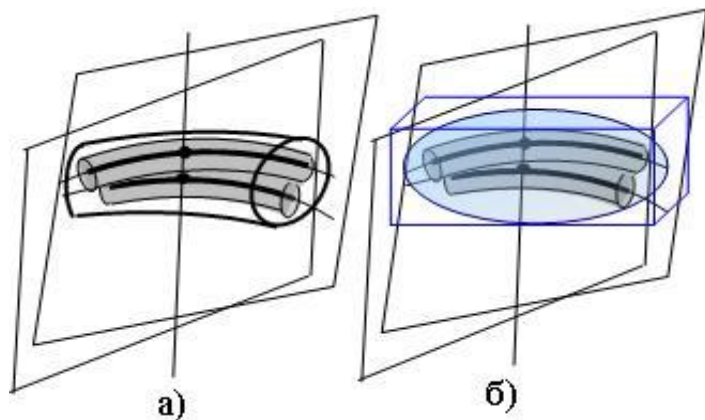
Исследование поликонфликтных ситуаций требует развития двух направлений. Первое направление предполагает моделирование и анализ множеств орбитальных объектов различного состава с целью исследования закономерностей появления и развития поликонфликтных ситуаций в зависимости от числа орбитальных объектов рассматриваемого множества и их орбитальных параметров. Второе направление связано с анализом различных вариантов поликонфликтных групп объектов (в частности – с исследованием зависимости характеристик протекания поликонфликта от числа объектов группы и значений их орбитальных параметров). В данной работе представлены исследования в рамках второго направления.



**Рис. 1.** К определению узла конфликтов и зоны конфликтов в его окрестности: в) узел конфликтов, образованный траекториями объектов А и В и окружающая его зона конфликтов; б) участок траектории объекта А и окружающая его опасная зона; в) участок траектории объекта В и окружающая его опасная зона.

Следует отметить, что анализ поликонфликтных ситуаций предполагает также рассмотрение областей пространства, в которых существует потенциальная возможность их возникновения (зон механических поликонфликтов). Для определения зоны поликонфликтов вначале остановимся на определении зоны конфликтов. Под зоной механического конфликта будем понимать область пространства, охватывающую участки траекторий пары орбитальных объектов, расположенные друг относительно друга на расстоянии опасного сближения (опасные участки), в частности, на расстоянии, меньшем некоторого граничного значения  $L_{mg}$ , определенного из соображений безопасности. Пару таких участков траекторий назовем узлом механических конфликтов, а наиболее близкие точки этих участков – узловыми точками [2,3]. На рис. 1а показан узел конфликтов, образованный опасными участками траекторий объекта А (рис. 1б) и объекта В (рис. 1в). Возможны различные подходы к описанию формы зоны конфликтов. Наиболее строгий подход предполагает рассмотрение этой зоны как объединения двух трубок,

охватывающих опасные участки траекторий (рис. 1а). В качестве средней линии каждой трубки можно, например, рассматривать орбиту объекта, определяемую только с учетом вековых значений орбитальных параметров. Радиус сечения трубки может быть принят постоянным. При описанном подходе к определению средней линии значение радиуса сечения определяется



**Рис. 2. Варианты упрощенного описания зоны конфликтов в окрестности узла конфликтов: а) трубчатая зона; б) зона в виде эллипсоида или параллелепипеда.**

с учетом максимальных отклонений движения орбитального объекта от выбранной средней линии вследствие периодических изменений значений орбитальных параметров, а также с учетом возможных максимальных отклонений, обусловленных погрешностями расчетного определения текущих положений.

Более общий подход к определению зоны конфликтов предполагает рассмотрение некоторого объема, полностью

охватывающего опасные участки траекторий с окружающими их трубками. Этот объем может рассматриваться в виде трубчатой зоны постоянного диаметра (рис. 2а), а также в виде эллипсоида или параллелепипеда (рис. 2б). В данной работе не будем останавливаться на расчете параметров этих объемов.

Определим элементарный узел поликонфликтов. На рисунке 3а представлен узел конфликтов  $U_X$ , образованный участками траекторий объектов А и В, а на рис. 3б, – узел  $U_Y$ , образованный участками траекторий объектов А и С. На рис. 4 показано расположение обоих названных узлов. Опасные участки траекторий объекта А, входящие в узлы  $U_X$  и  $U_Y$ , перекрываются (имеет место пересечение множеств точек этих участков). На участке траекторий, который входит и в узел конфликтов, создаваемый объектами А и В, и в узел конфликтов, образуемый объектами В и С, для орбитального объекта А возможно одновременное сближение и с объектом В, и с объектом С, то есть поликонфликт. Будем говорить, что два рассматриваемых узла «сцеплены» между собой (через участок траектории объекта А, который назовем «сцепляющим»), и рассматривать совокупность этих двух узлов как элементарный узел поликонфликтов.

Если два узла конфликтов сцеплены между собой только через участок траектории одного объекта, то будем говорить, что это «узел слабой сцепленности». Пример узла слабой сцепленности показан на рис. 5 на примере сцепления узлов  $U_X$  и  $U_Y$ , образованных объектами А, В и А,С соответственно (на рис. 5а дано его пространственное представление, а на рис. 5б –

схематическое изображение). Для каждой точки сцепляющего участка объекта А есть точка на опасном участке объекта В, находящаяся от него на некотором расстоянии  $L_{AB}$ , не превышающем граничное значение  $L_{mg}$ . Аналогично, для каждой точки сцепляющего участка объекта А есть точка на опасном участке объекта С, находящаяся от него на некотором расстоянии  $L_{AC}$ , не превышающем граничное значение  $L_{mg}$ .

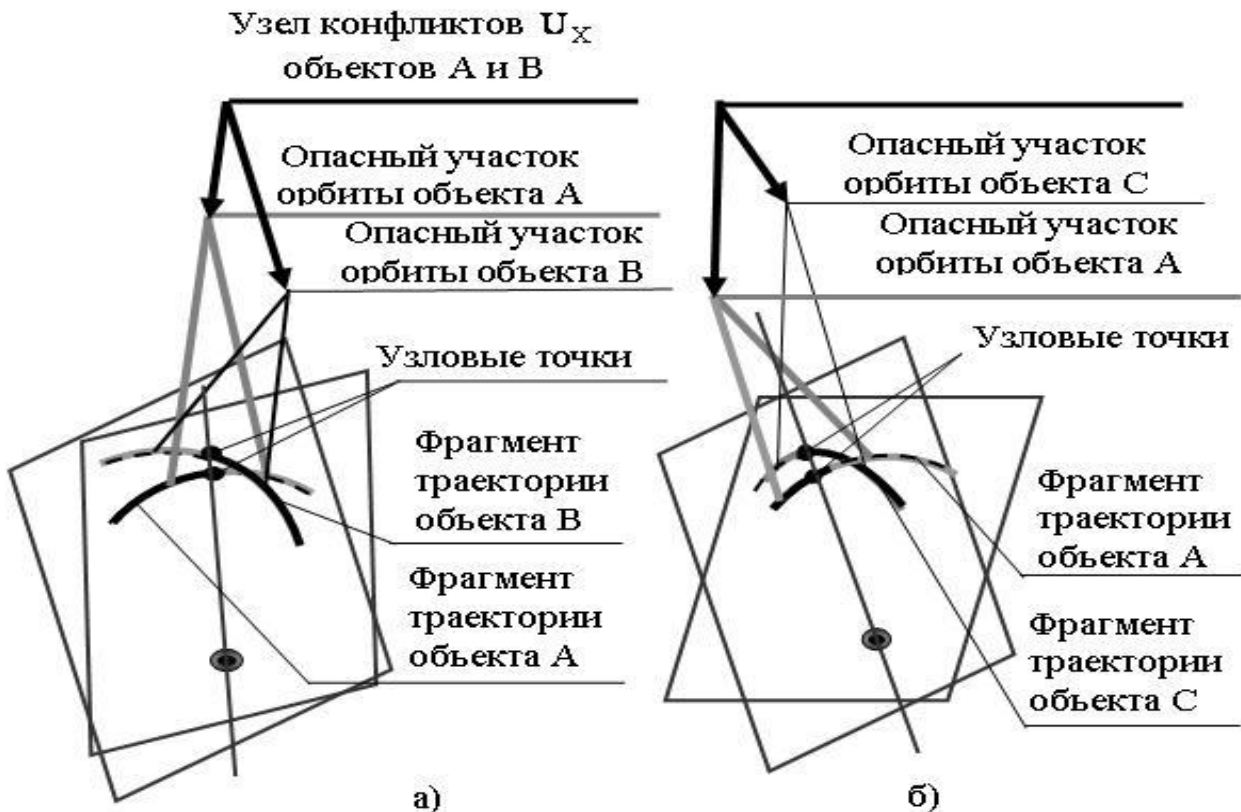


Рис. 3. Два узла конфликтов: а) узел  $U_X$  (образованный участками траекторий объектов А и В). б) узел  $U_Y$  (образованный участками траекторий объектов А и С).

Если не только участок объекта А входит одновременно в узлы конфликтов с объектами В и С, но объекты В и С также имеют участки, расположенные на опасном расстоянии друг от друга и входящие в узел конфликтов с объектом А, то объекты А, В и С образуют узел полной сцепленности. Такой узел показан на рис. 6 (на рис. 6а – его пространственное изображение, на рис. 6б – схематическое). В данном случае на опасных участках объектов В и С, входящих в узлы  $U_X$  и  $U_Y$  соответственно, есть участки, которые образуют узел конфликтов  $U_Z$  (для каждой точки участка объекта В есть точка на опасном участке объекта С, находящаяся от него на некотором расстоянии  $L_{BC}$ , не превышающем граничное значение  $L_{mg}$ ).



Если один и тот же участок траектории объекта А входит не в один, а в большее число узлов конфликтов, например, в  $q$  узлов, то будем говорить о его

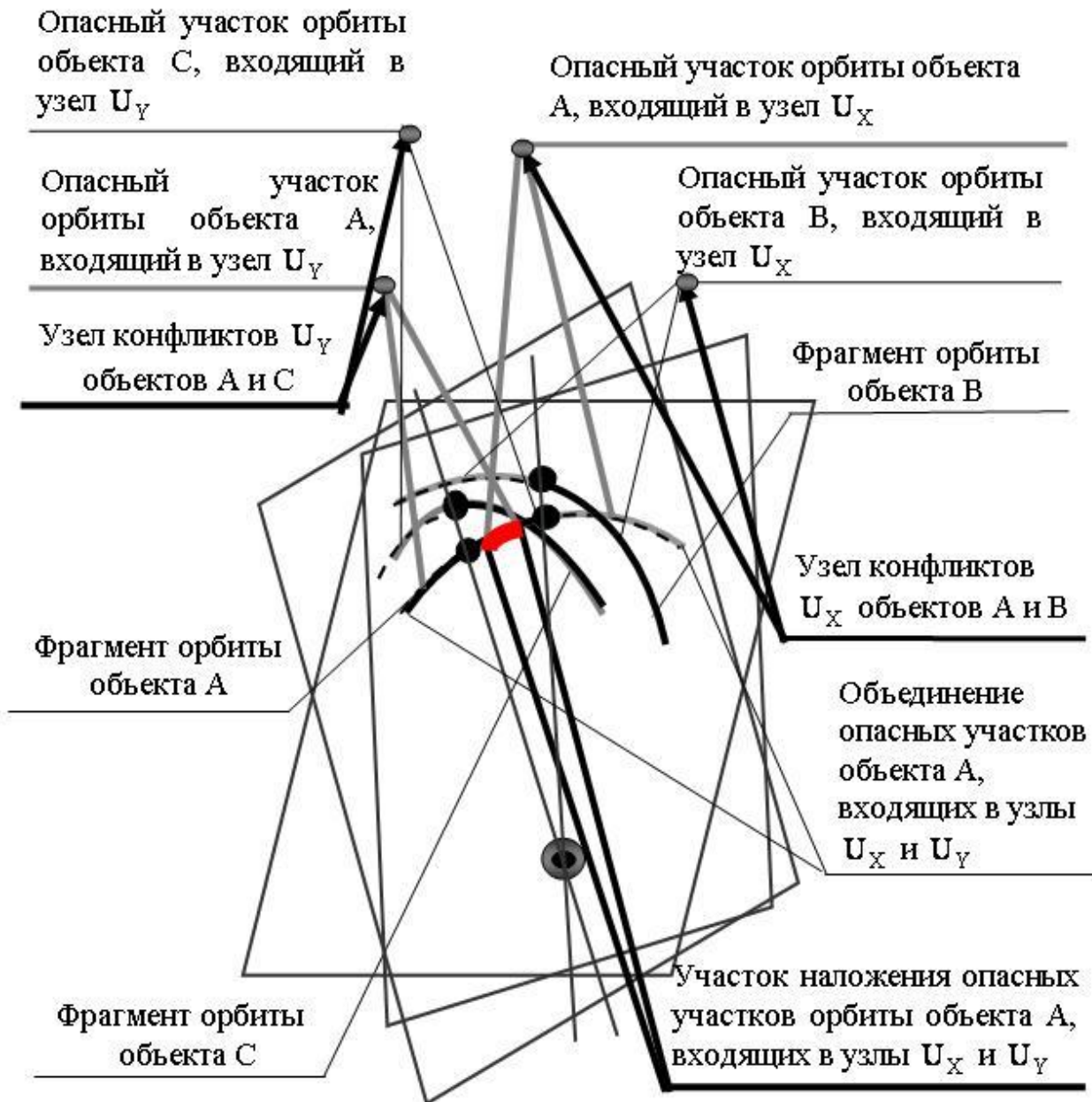


Рис. 4. Узел поликонфликтов, образованный сцеплением узла  $U_X$  (образованного участками траекторий объектов А и В) и узла  $U_Y$  (образованного участками траекторий объектов А и С)

вхождении в узел поликонфликтов со сцепленностью кратности  $q$  (или что он образует узел поликонфликтов кратности  $q$ ). Узел со сцепленностью кратности  $q$ , сцепленный через участок траектории какого-либо объекта (например, объекта А), может быть полностью слабой сцепленности (все  $q$  узлов конфликтов сцеплены только через участок траектории объекта А). Возможно также, что некоторые из участков траекторий других объектов, которые входят

в образованный узел со сцепленностью кратности  $q$ , могут быть связаны между собой отношением опасной близости, то есть образовывать узлы полной

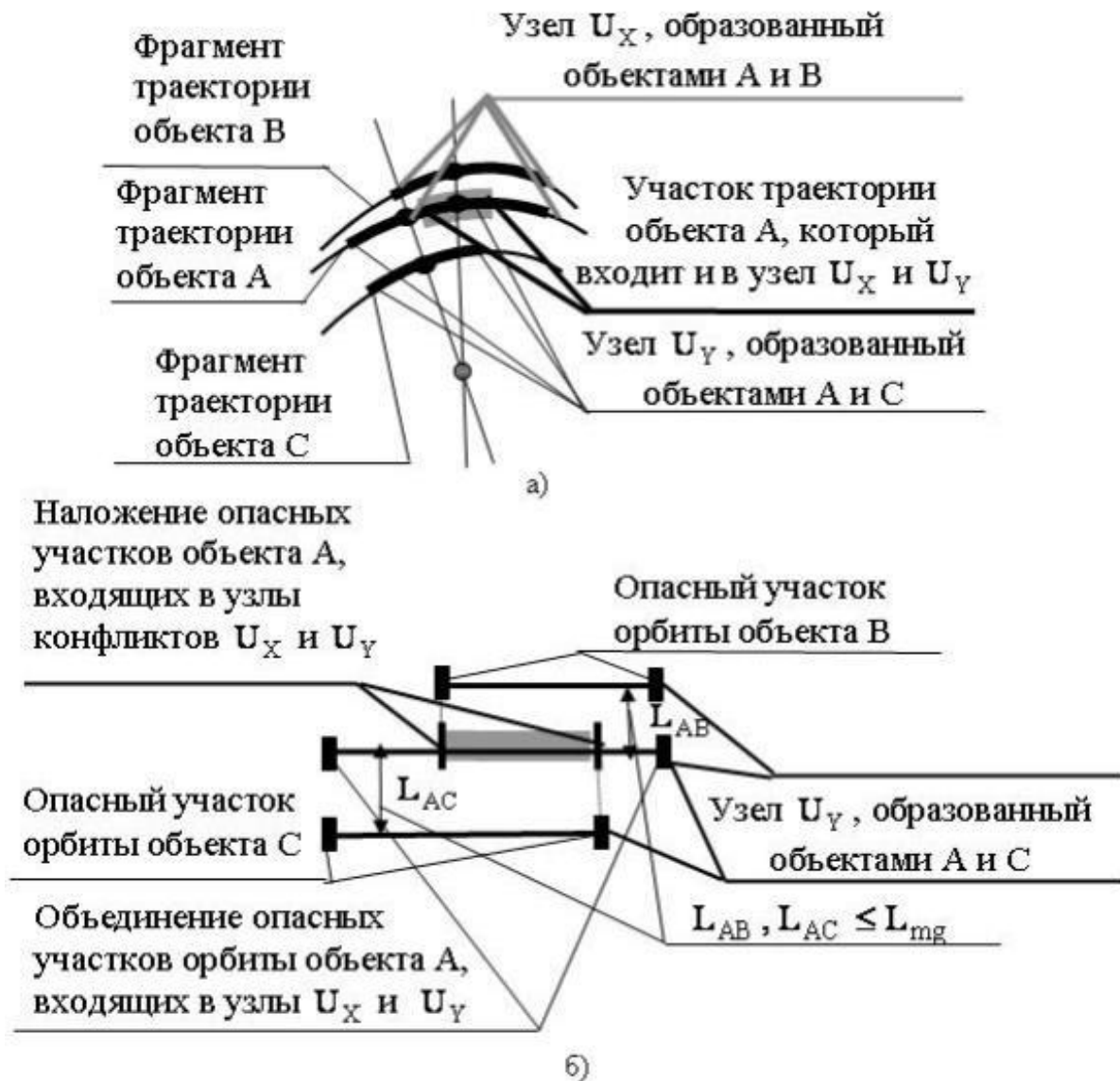


Рис. 5. Узел поликонфликтов неполной сцепленности, образованный сцеплением узлов конфликтов  $U_X$  и  $U_Y$ : а) изображение узла поликонфликтов; б) схематичное изображение узла поликонфликтов

сцепленности. В этом случае в узле с кратностью сцепленности  $q$ , для которого выполняется условие частичной сцепленности, можно выявить узлы с кратностью сцепленности  $q_c \leq q$ , для которых выполняется условие полной сцепленности. На рис. 4,5,6 показаны узлы (частичной или полной сцепленности) кратности 2. На рис. 7 приведен пример узла поликонфликтов с 4-х кратной сцепленностью (участок траектории объекта А входит в узлы конфликтов, образованные с объектами В, С, D, E).

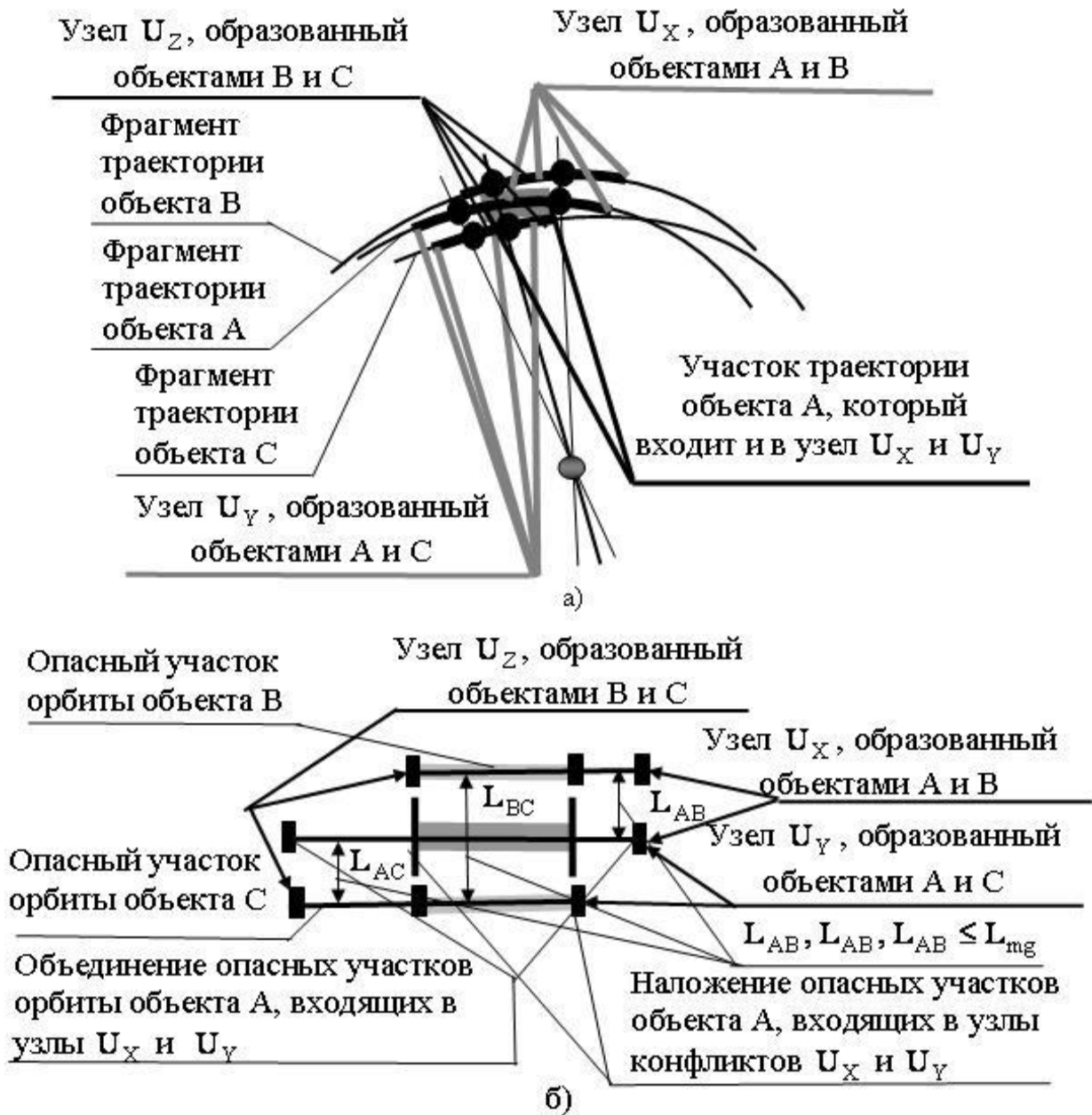


Рис. 6. Узел поликонфликтов полной сцепленности, образованный двумя сцепленными узлами конфликтов  $U_X$  и  $U_Y$ , которые также сцеплены через узел  $U_Z$ : а) изображение узла поликонфликтов; б) схематичное изображение узла поликонфликтов

Далее введем понятие поликонфликтной группы узлов (или группы связанных узлов поликонфликтов). Для этого рассмотрим три узла конфликтов (рис. 8): 1) узел  $U_X$ , образованный траекториями объектов А и В; 2) узел  $U_Y$ , образованный траекториями объектов А и С, сцепленный с узлом  $U_X$  через участок траектории объекта А; 3) узел  $U_Z$ , образованный траекториями объектов С и D, сцепленный с узлом  $U_Y$  через участок траектории объекта С.



Таким образом, между узлами  $U_X$  и  $U_Z$  существует опосредованная связь через узел  $U_Y$ . Будем говорить, что элементарные узлы поликонфликтов  $E_{XY}$

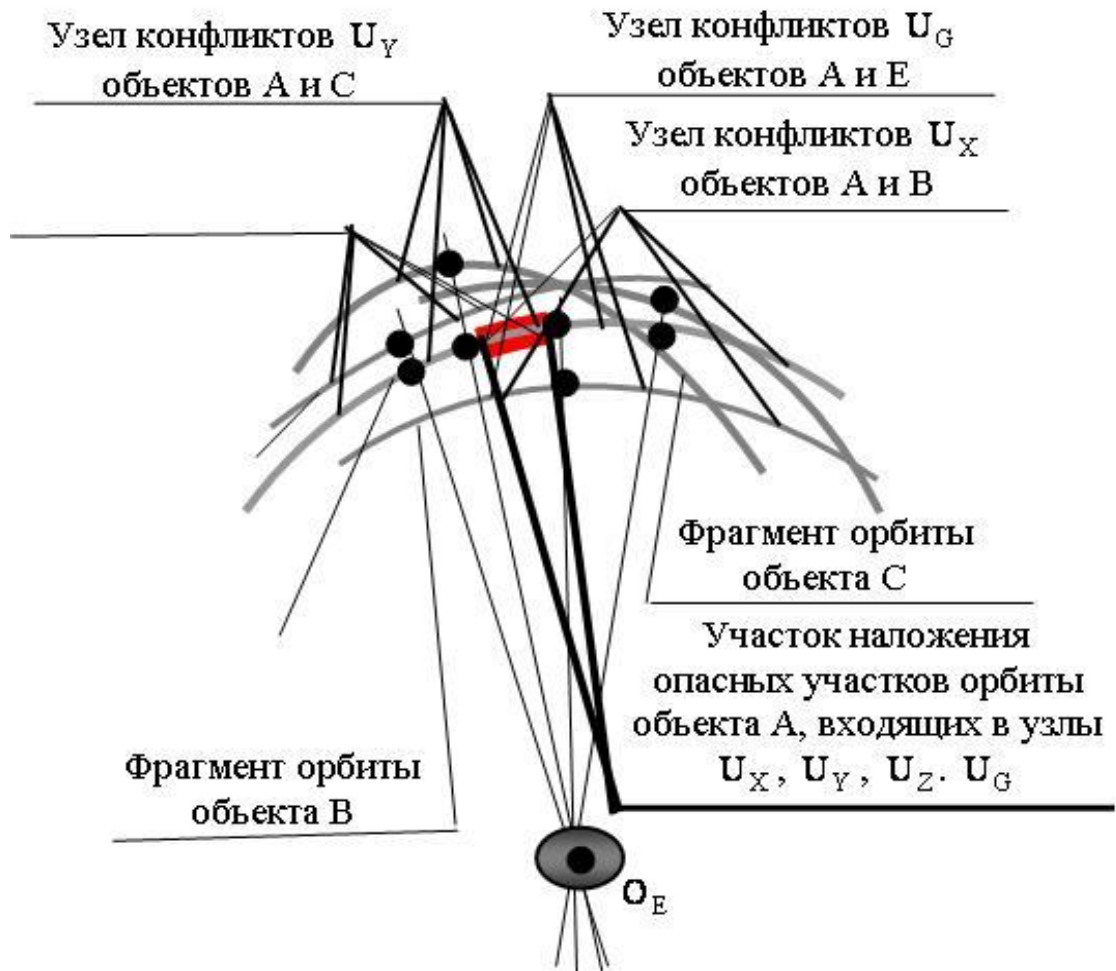


Рис. 7. Узел поликонфликтов со сцеплением кратности 4 через участок траектории объекта А

(образованный сцепленными узлами  $U_X, U_Y$ ) и  $E_{YZ}$  (образованный сцепленными узлами  $U_Y, U_Z$ ), связанные между собой через узел  $U_Y$ , «накладываются» друг на друга и образуют поликонфликтную группу связанных узлов (или узел множественных конфликтов).

В приведенном примере представлена группа узлов со слабой связностью (или слабо связанный узел множественных конфликтов). Признак включения узла в группу узлов слабой связности – наличие непосредственной связи (то есть сцепленности) хотя бы с одним узлом этой группы. В данном случае в составе группы слабой связности три узла (каждый имеет непосредственную связь хотя бы с одним узлом группы, а узел  $U_Y$  связан с двумя узлами). В общем случае можно говорить о группе узлов со связностью  $Q$  (о группе узлов связности  $Q$ , или иначе – о группе узлов  $Q$  кратной связности).

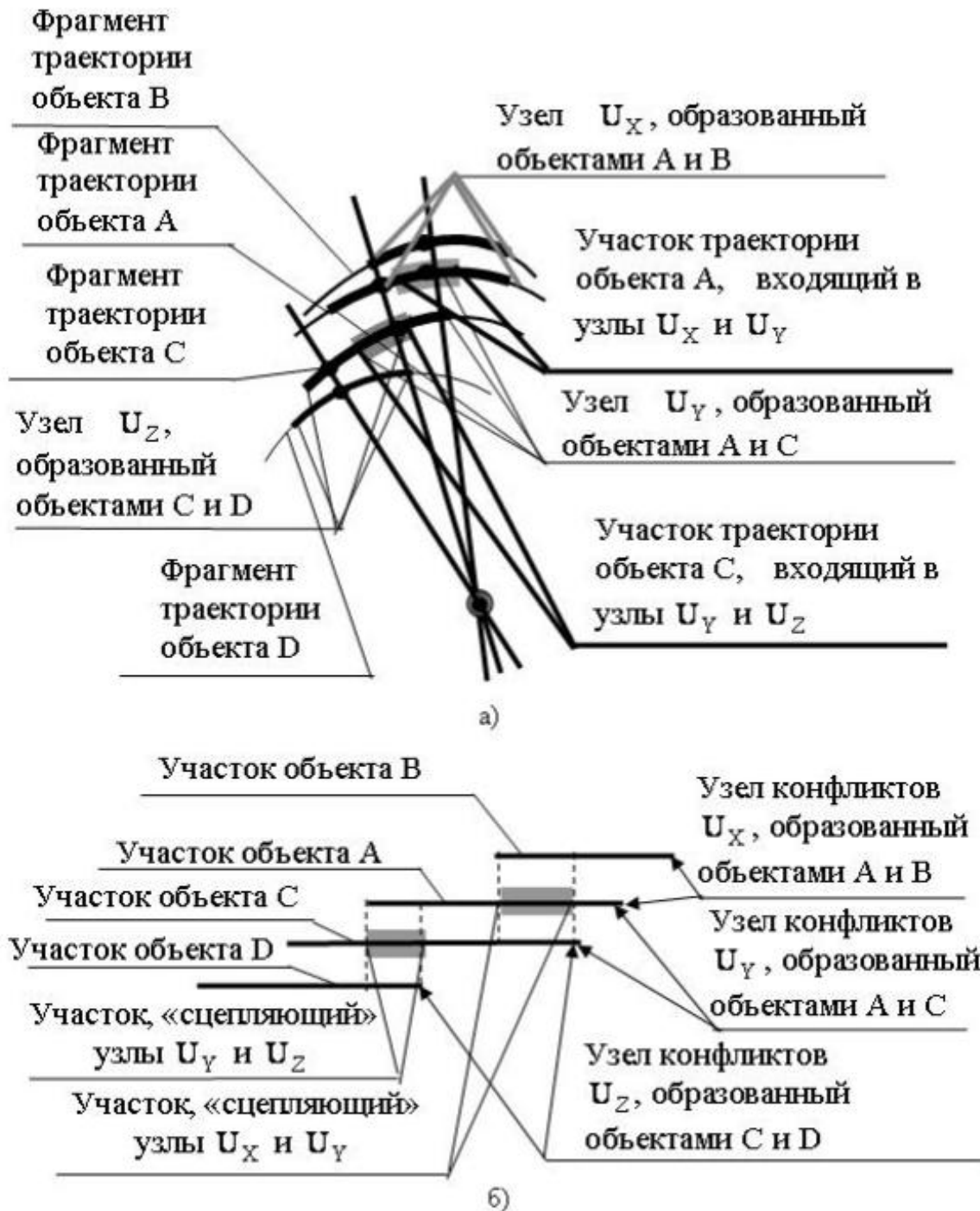


Рис. 8. Узел множественных поликонфликтов, включающий в себя узлы  $U_X$ ,  $U_Y$ ,  $U_Z$ , связанные через узел  $U_Y$ : а) изображение узла поликонфликтов; б) схематическое изображение узла поликонфликтов.

Признак вхождения в такую группу для каждого из узлов – наличие связей не менее чем с  $Q$  другими узлами группы. Внутри группы узлов меньшего значения связности  $Q$  можно выделить группы с большим значением

связности  $Q_C$  ( $Q_C \geq Q$ ). Следует подчеркнуть, что под  $Q$  связями узла с другими узлами группы понимается его сцепленность с  $Q$  узлами этой группы, но не обязательно через один и тот же участок траектории.

Таким образом, узел множественного поликонфликта (группа связанных поликонфликтных узлов) может быть представлен как занимающая некоторую область пространства группа связанных между собой узлов конфликтов. Область пространства, определенную таким образом, чтобы она полностью охватывала группу связанных узлов поликонфликтов с учетом возможных отклонений объектов от расчетных траекторий, назовем зоной поликонфликтов. Упрощенный подход к описанию формы зоны поликонфликтов – представление ее в виде эллипса (в частном случае – в виде круга) или в виде параллелепипеда (в частном случае – в виде куба), рис. 9.

Эволюция орбит под действием возмущающих сил приводит к эволюции зоны поликонфликтов (изменяются ее размеры и расположение в пространстве, состав входящих в нее опасных участков траекторий). Исследование потенциальной возможности групповых сближений орбитальных объектов в зоне поликонфликтов – один из аспектов анализа в каждом из двух описанных выше исследовательских направлений.

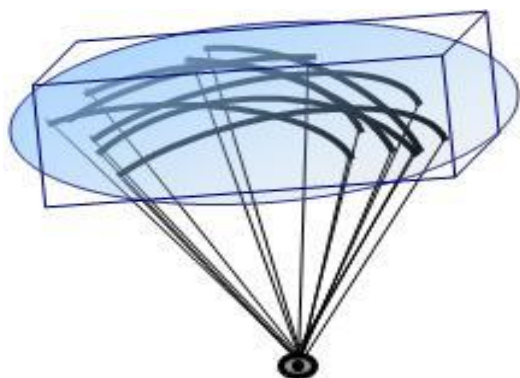


Рис. 9. Зона поликонфликтов, окружающая группу связанных узлов поликонфликтов

Математические модели и методы, которые могут быть использованы для анализа поликонфликтных ситуаций можно условно разделить на две группы (как и в случае исследования «моноконфликтов», образуемых парой орбитальных объектов, находящихся на опасном расстоянии друг от друга). К первой группе отнесем те, которые обеспечивают реализацию моделирования движения орбитальных объектов, контроль текущих расстояний между ними, фиксацию появления и протекания

поликонфликтов, а также обработку накапливающейся информации. Подобные исследования требуют численных методов моделирования, развитие которых представлено, например, в работе [4]. Основная проблема реализации этих методов, – существенные затраты времени на вычисления. Однако на основе этих методов можно получить результаты моделирования поликонфликтов с высокой степенью адекватности (используя математические модели, достаточно подробно учитывающие силы, воздействующие на орбитальные объекты). Ко второй группе моделей и методов, обеспечивающих анализ конфликтных сближений, относятся те, которые обеспечивают подход, основанный на моделировании изменения во времени параметров орбит объектов и анализе текущей геометрии траекторий (в частности, –

моделирование эволюции орбит вследствие вековых изменений значений параметров, которое можно реализовывать с достаточно крупным шагом по времени). При таком подходе анализ относительного расположения траекторий орбитальных объектов позволяет выделить участки траекторий, находящихся в опасной близости друг относительно друга. После определения опасных участков траекторий без непосредственного моделирования движения орбитальных объектов с учетом периодичности этого движения выявляются ситуации опасных сближений и оцениваются основные параметры, характеризующие сближения. Математические модели и методы этой группы (они представлены, например, в работах [2,3,5-9]) не дают высокой точности прогноза характеристик поликонфликтных ситуаций, но обеспечивают достаточно быстрое получение результатов (затраты времени на несколько порядков меньше, чем при использовании моделей и методов первой группы). Целесообразно использовать как методы первой, так и методы второй группы, отдавая предпочтение методам второй группы на начальных этапах анализа и добавляя методы второй группы на последующих этапах, когда с помощью методов первого направления во множестве орбитальных объектов выделены группы объектов, для которых высока вероятность возникновения конфликтных или поликонфликтных ситуаций. Кроме того, представляет интерес развитие методов анализа на основе комбинации методов первой и второй группы.

Проведение исследований механических поликонфликтов в околоземном космосе, как их потенциальной возможности, так и различных вариантов протекания, требуют исходных данных. Наряду с рассмотрением множеств орбитальных объектов с известными орбитальными параметрами представляет интерес проведение исследований на базе гипотетических («сгенерированных» исследователем) групп орбитальных объектов. «Генерация» множества орбитальных объектов позволяет исследователям варьировать «сложность» ситуации (прежде всего, изменяя численность объектов рассматриваемого множества), выбирать орбитальные параметры объектов таким образом, чтобы более явно выделить определенные аспекты исследования, и прочее.

Генерация множеств орбитальных объектов целесообразна, во-первых, при проведении исследований первого из описанных выше направлений (в этом случае генерируются множества орбитальных объектов, в которых выявляют поликонфликтные группы, как потенциально опасные, так и входящие в поликонфликтные сближения). Во-вторых, при проведении исследований второго из описанных направлений (в этом случае генерируются собственно поликонфликтные группы объектов, либо потенциально опасные с точки зрения возникновения поликонфликтных ситуаций, либо непосредственно образующие такие ситуации на рассматриваемом отрезке времени). В данной работе рассматриваются вопросы формирования гипотетических поликонфликтных групп для проведения исследований второго направления.

Различные аспекты анализа опасных сближений на орбитах достаточно широко освещены в публикациях. Во многих работах представлены результаты



исследований, проведенные как на основе данных о множестве объектов в околоземном космосе, так и на основе гипотетических данных. Однако тема генерации гипотетических данных для задач исследования конфликтных и поликонфликтных ситуаций на орбитах подробно не освещался. Данная работа посвящена именно этому вопросу.

Один из признаков, на основе которого можно разделить методы генерации гипотетических данных для проведения эксперимента – это случайная или детерминированная генерация. Методы случайной генерации, реализуются на основе моделирования случайных величин с заданными законами распределения, обеспечивающих вариации значений рассматриваемых параметров исследуемой системы. В детерминистических методах генерации исходные данные либо непосредственно задаются исследователем, либо формируются программно на основе заданного им детерминистического алгоритма. Также возможны различные комбинации этих подходов. Методы случайной генерации требуют значительно больших временных затрат для выявления исследуемых закономерностей поведения объекта исследования, однако в некоторых случаях возможно применение только этих методов. Использование детерминистических методов часто позволяет сократить время на проведение исследований, если интересующие исследователя параметры варьируются в заданных пределах систематически с привлечением методов планирования экспериментов. В данной работе основное внимание уделяется детерминистическим методам генерации гипотетических поликонфликтных зон и поликонфликтных групп орбитальных объектов.

**Цель и задачи данной работы.** Цель работы – развитие методов исследования поликонфликтных сближений орбитальных объектов на основе сгенерированных групп орбитальных объектов. В работе предполагается решение следующих задач: 1) анализ походок к генерации гипотетических данных для проведения исследований поликонфликтных зон в околоземном космическом пространстве и ситуаций поликонфликтных сближений орбитальных объектов; 2) разработка метода генерации поликонфликтных групп орбитальных объектов на основе конфигурирования исследователем поликонфликтной зоны; 3) разработка концепции анализа потенциальной возможности возникновения поликонфликтных ситуаций и вариантов протекания поликонфликтов для сгенерированной поликонфликтной группы объектов на основе комбинирования математических моделей и методов первой и второй описанных выше групп.

### **1. Анализ подходов к генерации гипотетических поликонфликтных групп орбитальных объектов, обоснование предлагаемого выбора.**

Рассмотрим несколько возможных подходов к генерированию поликонфликтной группы (которые, очевидно, в той или иной форме могли быть использованы другими авторами при формировании наборов гипотетических данных для исследований).

Первый подход базируется на задании разности значений орбитальных параметров объектов моделируемой поликонфликтной группы. При этом возможны вариации моделирования при неизменном базовом объекте, – на заданный момент времени (назовем его моментом времени генерации  $t_g$ ) выбирается оскулирующая орбита базового объекта и заданы значения отличий одноименных орбитальных параметров каждого из объектов поликонфликтной группы от параметров базового. Также возможны вариации моделирования при «переходящем» базовом объекте, – каждый очередной орбитальный объект группы, для которого выбраны орбитальные параметры, рассматривается как базовый, и относительно него выбираются параметры следующего генерируемого объекта группы. Относительно текущего базового объекта может быть сгенерирован не один, а несколько объектов. Таким образом, генерация относительно неизменного базового объекта – частный случай.

Описанный подход может быть полезен при исследованиях влияния разности значений орбитальных параметров объектов группы на состав участков орбит, входящих в поликонфликтную зону, на их расположение в зоне, а также собственно на варианты протекания поликонфликтов. При таком подходе рассматриваются различные комбинации разности значений орбитальных параметров объектов группы (при этом стремление получить поликонфликтную группу приводит к необходимости выбора для нескольких из параметров малых значений отклонений, по крайней мере, для каждой пары «базовый и генерируемый объекты»). Выбирая значение параметров базового объекта и значения отличий от них для параметров генерируемого объекта можно в некоторой степени «управлять» формированием зоны полконфликта и расположением в ней опасных участков траекторий орбитальных объектов.

«Чувствительность» вероятности возникновения конфликтной ситуации и параметров опасных сближений к разности значений одного из параметров базового и генерируемого объекта зависит и от значений параметров базового объекта, и от разности значений других параметров. Поэтому при анализе различных вариаций значений орбитальных параметров не всегда будет обеспечена потенциальная возможность конфликтной ситуации (и тем более конфликтная ситуация) для пары базовый объект и генерируемый объект. Поэтому поликонфликтная зона, образованная участками «сгенерированной» описанным образом группы объектов, может включить в свой состав участки траектории не всех объектов (не все объекты будут потенциально опасными с точки зрения возникновения поликонфликта). Еще больше вероятность того,

что не все орбитальные объекты сгенерированной группы одновременно войдут в зону поликонфликта (не все объекты образуют поликонфликтную группу).

Таким образом, на основе данного подхода генерируются оскулирующие орбиты группы объектов в момент времени генерации  $t_g$ . Исследование этой группы предполагает моделирование и анализ ее «предистории» на некотором интервале времени, предшествующем моменту  $t_g$ , и «последующего развития» на интервале времени после момента  $t_g$ .

Проведение исследований сгенерированной групп объектов целесообразно с использованием моделей первой и второй описанных выше групп (то есть на основе моделирования движение объектов и анализа текущих расстояний между ними, а также на основе моделирования эволюции орбит и использования быстрых методов прогноза конфликтных ситуаций). Анализ поликонфликтов на основе описанного подхода предполагает рассмотрение значительного множества вариантов значений орбитальных параметров, которое существенно увеличивается с ростом числа рассматриваемой группы объектов.

Второй подход заключается в том, что для заданного момента времени  $t_g$  задаются точки местоположения орбитальных объектов группы (эти положения определяют координаты в абсолютной системе координат). Предполагается, что композиция расположения точек соответствуют текущей поликонфликтной ситуации между этими объектами. А именно: каждая точка группы имеет хотя бы одну точку, находящуюся на опасном расстоянии от нее (образует «опасную пару» с другой точкой); а каждая опасная пара точек «связана» с другими опасными парами тем, что в паре есть хотя бы одна точка, входящая в две пары опасно близких точек. По аналогии с узлами конфликтов будем говорить, что описанная группа точек образует группу слабой связности. Эта группа может быть группой связности большей кратности или включать в себя подгруппы большей кратности. Параметры орбит объектов подбираются таким образом, чтобы траектории их движения соответствовали местоположению объектов в выбранных точках. В данном случае при выборе оскулирующей орбиты в момент  $t_g$  можно варьировать значения только трех орбитальных параметров каждого из объектов. Такой подход обеспечивает генерацию группы объектов, каждый из которых не только потенциально опасен с точки зрения возможности вхождения в поликонфликт, но гарантированно участвует в поликонфликтной ситуации в момент времени генерации  $t_g$ . Этот подход также позволяет в некоторой степени (при учете ограничений) определять расположение и конфигурацию зоны поликонфликтов. Однако он не подходит для того случая, когда необходимо сгенерировать группу объектов, образующих зону поликонфликтов, но не находящихся в ней а полном составе в момент времени  $t_g$ . Как и в первом подходе, исследование возможно на основе моделирования и анализа предыстории и последующего развития

смоделированной группы объектов с использованием моделей и методов первой и второй группы.

Третий подход основывается на генерации для заданного момента времени  $t_g$  группы близко расположенных траекторий, образующих узел поликонфликтов (определение которого дано во введении). При генерации выбирается базовая траектория (задаются орбитальные параметры, определяющие форму и расположение базовой орбиты). Далее относительно базовой траектории определяется генерируемая траектория. Форма и расположение генерируемой траектории должно обеспечить образование узла

конфликтов с базовой траекторией, некоторые характеристики которого заданы (например, расстояние между наиболее близкими точками опасных участков, входящих в узел конфликтов, и угол между орбитальными плоскостями, которым принадлежат базовая и генерируемая траектории). В общем случае базовая траектория – «переходящая» (сгенерированная траектория становится базовой на следующем шаге генерации). Если сравнивать этот подход с описанными выше подходами, то он позволяет исследователю в наибольшей степени влиять на формирование конфигурации узла поликонфликтов (то есть на формирование композиции расположения опасных участков траекторий в зоне поликонфликтов) и его расположение в пространстве. Сформировав поликонфликтную зону, можно варьировать варианты поликонфликтных ситуаций в этой зоне (на сгенерированном узле поликонфликтов), выбирая различные сочетания моментов времени входа орбитальных объектов в узел.



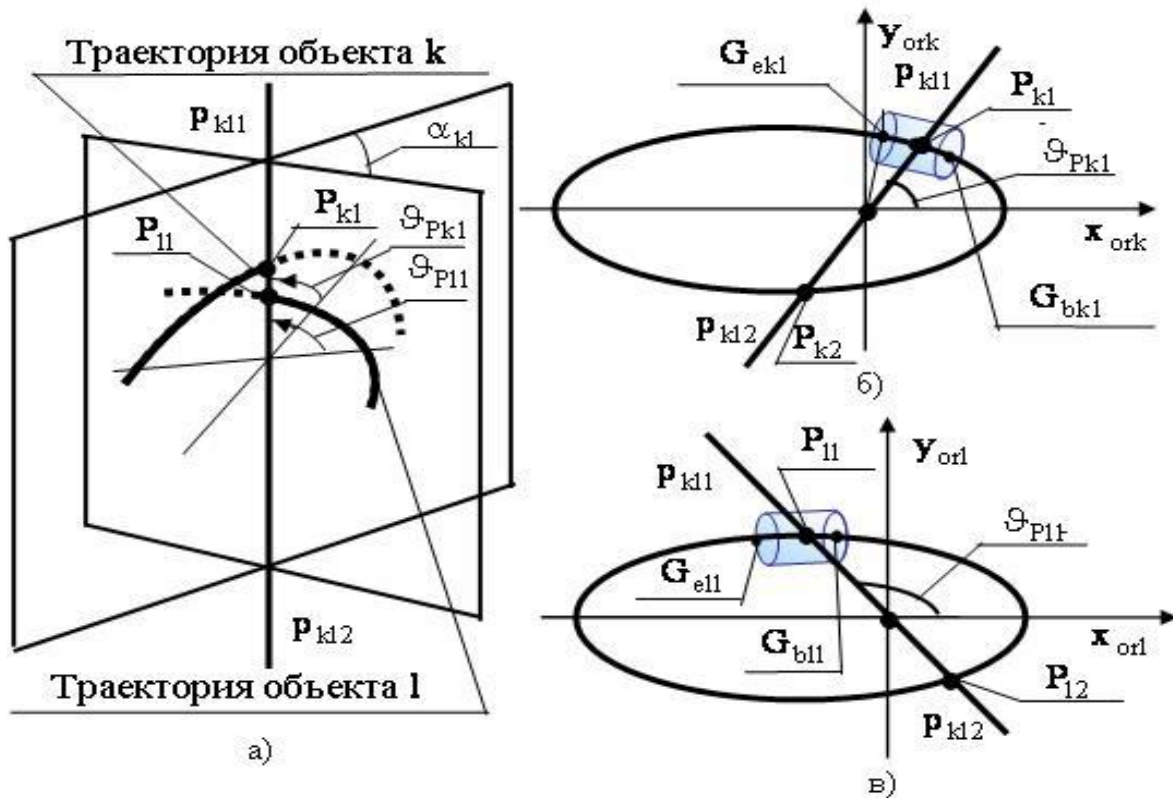


Рис. 10. К пояснению определения опасных участков траекторий, входящих в узел конфликтов: а) пространственное изображение узла конфликтов, образованного объектами  $k$  и  $l$ ; картина в орбитальной плоскости объекта  $k$ ; картина в орбитальной плоскости объекта  $l$

Ниже представлен метод генерации гипотетической поликонфликтной зоны, позволяющий исследователю создавать ее без существенных затрат времени, формируя конфигурацию на каждом шаге генерации.

**2. Общее описание метода «объемного плетения», предлагаемого для генерации узла поликонфликтов.**

Перед началом общего описания предлагаемого метода генерации поликонфликтной зоны коротко напомним необходимые для этого основные положения подхода к определению узла конфликтов, представленные в ряде работ, например, в работах [2,3]. Пусть в некоторый момент времени  $t$  узел конфликтов образован траекториями орбитальных объектов  $k$  и  $l$  (рис. 10а). Орбитальные параметры этих объектов соответственно следующие: эксцентриситет –  $e_k$  и  $e_l$ ; большая полуось  $a_k$  и  $a_l$  (а фокальный параметр –  $p_k$  и  $p_l$ ); наклонение орбиты  $i_k$  и  $i_l$ ; долота восходящего узла –  $\Omega_k$  и  $\Omega_l$ ; аргумент перигея  $\omega_k$  и  $\omega_l$ , момент времени прохождения перигея  $\tau_k$  и  $\tau_l$ .

Линию пересечения  $p_{kl1}p_{kl2}$  между орбитальными плоскостями объектов  $k$  и  $l$  (рис. 10) задает система уравнений

$$\begin{cases} A_k x + B_k y + C_k z = 0 \\ A_l x + B_l y + C_l z = 0 \end{cases}$$

где

$$A_k = \sin(i_k) \sin(\Omega_k), \quad B_k = -\sin(i_k) \cos(\Omega_k), \quad C_k = \cos(i_k), \quad A_l = \sin(i_l) \sin(\Omega_l), \\ B_l = \sin(i_l) \cos(\Omega_l), \quad C_l = \cos(i_l).$$

Угол  $\alpha_{kl}$  между их орбитальными плоскостями объектов  $k$  и  $l$  (рис. 10а) определяется выражением

$$\alpha_{kl} = \arccos(|A_k A_l + B_k B_l + C_k C_l|).$$

Принимается, что в качестве узловых точек опасных участков траекторий, входящих в узел конфликтов, будет рассматриваться пара точек пересечения этих участков с линией пересечения их орбитальных плоскостей. В частности, для объектов  $k$  и  $l$  узловые точки –  $P_{kl}$  для объекта  $k$  (рис. 10а,б) и  $P_{ll}$  для объекта  $l$  (рис. 10а,в). Положение узловой точки на траектории будем определять углом, который отсчитывается в плоскости движения орбитального объекта от направления на перигей до этой точки по ходу движения спутника. На рис. 10а,б положение узловой точки  $P_{kl}$  на опасном участке орбитального объекта  $k$  определяет угол  $\theta_{P_{kl}}$ , а на рис. 10а,в положение узловой точки  $P_{ll}$  на опасном участке орбитального объекта  $l$  определяет угол  $\theta_{P_{ll}}$ . Описанный угол можно рассматривать как значение истинной аномалии, которое было бы у орбитального объекта при его нахождении в этой точке, если истинную аномалию на текущем витке начинать отсчитывать от перигея. Поэтому этот угол можно назвать истинной аномалией узловой точки. Для расчета значения истинной аномалии, определяющей положение точки  $P_{kl}$ , предложено выражение

$$\theta_{P_{kl}} = \arctg\left(-\frac{A_l m_{k1,1} + B_l m_{k2,1} + C_l m_{k3,1}}{A_l m_{k1,2} + B_l m_{k2,2} + C_l m_{k3,2}}\right),$$

где

$$\begin{aligned} m_{k11} &= \cos(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) - \sin(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k) \cdot \cos(i_k), \\ m_{k12} &= -\cos(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k) - \sin(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) \cdot \cos(i_k), \\ m_{k21} &= \sin(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) + \cos(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k) \cdot \cos(i_k), \\ m_{k22} &= \cos(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) \cdot \cos(i_k) - \sin(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k), \\ m_{k31} &= \sin(\omega_k) \cdot \sin(i_k), \\ m_{k32} &= \cos(\omega_k) \cdot \sin(i_k). \end{aligned}$$

– элементы матрицы перехода из геоцентрической орбитальной системы орбитального объекта  $k$  в геоцентрическую экваториальную систему.

Аналогичным образом рассчитывается значение угла  $\vartheta_{P_{11}}$ , определяющего положение точки  $P_{11}$  на траектории объекта 1:

$$\theta_{P_{11}} = \arctg\left(-\frac{A_k m_{11,1} + B_k m_{12,1} + C_k m_{13,1}}{A_1 m_{k1,2} + B_1 m_{k2,2} + C_1 m_{k3,2}}\right),$$

где

$$\begin{aligned} m_{111} &= \cos(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) - \sin(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k) \cdot \cos(i_k), \\ m_{112} &= -\cos(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k) - \sin(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) \cdot \cos(i_k), \\ m_{121} &= \sin(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) + \cos(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k) \cdot \cos(i_k), \\ m_{122} &= \cos(\Omega_k) \cdot \cos(\omega_k) \cdot \cos(i_k) - \sin(\Omega_k) \cdot \sin(\omega_k), \\ m_{131} &= \sin(\omega_k) \cdot \sin(i_k), \\ m_{132} &= \cos(\omega_k) \cdot \sin(i_k). \end{aligned}$$

Линия пересечения орбитальных плоскостей  $P_{k1}P_{k2}$  пересекает траекторию объекта в двух точках ( $P_{k1}$  и  $P_{k2}$  для объекта  $k$  на рис. 10а,б и  $P_{11}$  и  $P_{12}$  для объекта 1 на рис. 10а,в), каждая из которых может быть узловой и принадлежать участку, входящему в узел конфликтов. Если положение точки  $P_{k1}$  определяет угол  $\vartheta_{P_{k1}}$ , то положение точки  $P_{k2}$  определяет угол  $\vartheta_{P_{k2}}$ , значение которого отличается от значения  $\vartheta_{P_{k1}}$  на  $\pi$ :

$$\vartheta_{P_{k2}} = \vartheta_{P_{k1}} + \pi.$$

Аналогичное справедливо и для углов  $\vartheta_{P_{11}}$  и  $\vartheta_{P_{12}}$ , определяющих положение точек  $P_{11}$  и  $P_{12}$  на траектории объекта 1.

Далее опишем метод генерации зоны поликонфликтов для заданного момента времени  $t_g$ . В предлагаемом методе генерации зоны поликонфликтов можно выделить однотипные последовательные операции, которые назовем шагами (шагами «плетения» от названия метода). На каждом шаге рассматриваются траектории двух орбитальных объектов  $k$  и 1. Орбита объекта  $k$  полностью определена (известны значения орбитальных параметров этого объекта на момент  $t_g$ ) и называется базовой (или опорной). Параметры орбиты объекта 1 определяются таким образом, чтобы обеспечить заданные параметры расположения опасного участка траектории 1, входящего узел конфликтов, относительно траектории объекта  $k$ , входящей в этот узел.

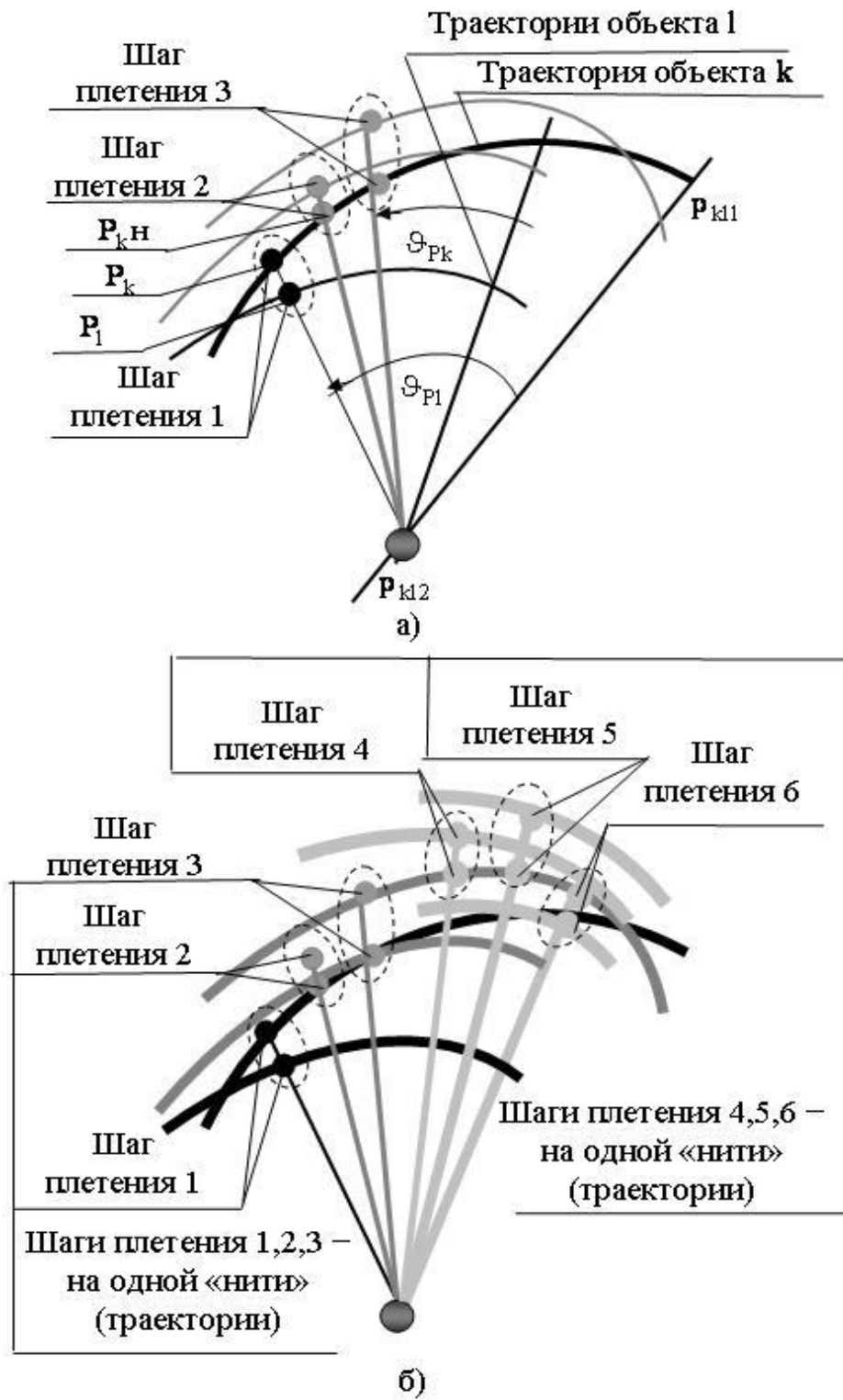


Рис. 11. К пояснению метода «объемного плетения»: а) шаги плетения на одной «нити» (траектории) с выделением одного шага плетения; б) шаги плетения на двух нитях (траекториях)



Начинается генерация с того, что задается первая базовая траектория, то есть задаются орбитальные параметры объекта  $k$  (рис. 11а,б). На орбите объекта  $k$  выбирается положение узловой точки, которая войдет в генерируемый узел конфликтов. Не будем выделять, является ли эта точка на траектории объекта  $k$  точкой  $P_{k1}$  или  $P_{k2}$ , и обозначим ее  $P_k$  (рис. 11а). Положение точки  $P_k$  на траектории определяет соответствующее ей значение истинной аномалии  $\vartheta_{Pk}$ .

Так как принято, что узловые точки находятся на линии пересечения орбитальных плоскостей, то узловая точка генерируемой траектории объекта  $l$  (обозначим ее  $P_l$ ) находится на одной прямой с точкой  $P_k$ , то есть радиус-векторы этих точек ( $r_{Pk}$  и  $r_{Pl}$  на рис. 11а) совпадают. Задается значение разности длин этих радиус-векторов  $\Delta_{rP}$  ( $\Delta_{rP} = r_{Pl} - r_{Pk}$ ), модуль которого не должен превышать значение граничного расстояния  $L_{mg}$ , определенного из соображений безопасности (то есть должно выполняться условие  $|\Delta_{rP}| \leq L_{mg}$ ). Пару точек  $P_k$  и  $P_l$  базовой и генерируемой траекторий будем называть не только узловой парой узла конфликтов, но и «узлом плетения». В частном случае точки  $P_k$  и  $P_l$  совпадают ( $\Delta_{rP} = 0$ ), то есть траектории в узле плетения не просто находятся на опасном расстоянии друг от друга, но и пересекаются. Также задается значение угла  $\alpha_{kl}$  между орбитальными плоскостями базового объекта  $k$  и генерируемого объекта  $l$ .

Перечисленные исходные данные позволяют найти значения пяти параметров генерируемой орбиты, определяющие ее форму и расположение в пространстве (кроме параметра, определяющего временную привязку объекта на орбите). Расчет параметров генерируемой траектории (ее еще можно назвать пересекающей траекторией) назовем шагом плетения. Траектория объекта  $k$  может рассматриваться базовая еще для нескольких шагов плетения (в частности, для шагов плетения 2 и 3 на рис. 11а,б). При этом каждая генерируемая траектория рассматривается по отношению к базовой как новая траектория  $l$  и «шаг плетения» («шаг генерации») реализуется на основе того же алгоритма, что и в предыдущем случае. Если на одной базовой траектории создается несколько узлов плетения (узлов конфликтов), то можно говорить, что эти узлы плетения на одной «нити плетения».

Далее каждая сгенерированная траектория  $l$  может рассматриваться как базовая траектория  $k$ , и уже для нее генерируется принятое число пересекающих траекторий  $l$  (реализуется принятое число шагов плетения). На рис. 11б показано, что в качестве новой базовой траектории выбрана пересекающая траектория, полученная на третьем шаге плетения. На это траектории, в свою очередь, реализовано еще три шага плетения. Для этого узловая точка  $P_k$  «переносится» вдоль траектории объекта  $k$  (точка  $P_{kn}$  на рис. 11а). При этом связанность узлов конфликтов нового шага плетения и

предыдущего будет обеспечена, если положение точки  $P_{kn}$  выбрано таким, чтобы расстояние между точками  $P_k$  и  $P_{kn}$  не превышало граничное значение  $L_{mg}$ . Таким образом, шаги плетения 1,2,3 выполнены на одной нити, а шаги плетения 4,5,6 – на другой, пересекающей ее. Аналогичные шаги плетения могут выполняться и на других траекториях.

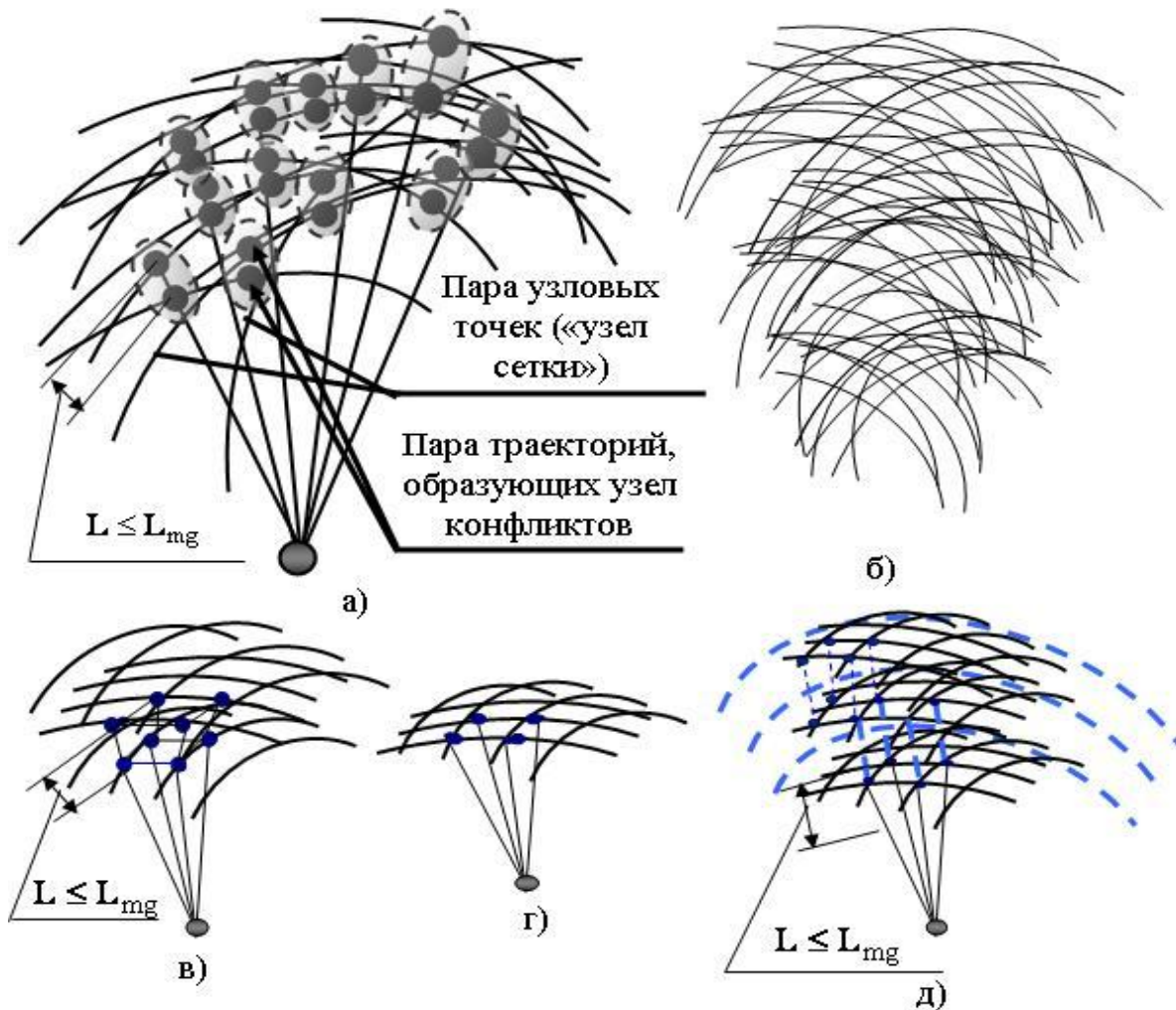


Рис. 12. К пояснению вариантов структур объемного плетения: а) произвольная структура объемного плетения (изображена с выделением пар узловых точек); б) произвольная структура объемного плетения с просматриваемыми «квасислоями» узловых точек; в) ячеистая структура объемного плетения с квазирегулярной структурой; г) однослойная ячеистая квазирегулярная структура с совпадающими точками узлов плетения; д) несколько однослойных структур плетения, расположенных на опасно близком расстоянии друг от друга.

На рис. 12 показаны примеры различных структур плетения. На рис. 12а и 12б приведены произвольные структуры объемного плетения (значения расстояния между узловыми точками и углы между орбитальными плоскостями

траекторий произвольно варьируются). На рис. 12б в такой структуре все же простраиваются «слои» в расположении узловых точек (узловые точки сгруппированы в окрестностях фрагментов объемных поверхностей).

На рис. 12в показана ячеистая структура квазирегулярного характера, на которой выделена одна из «ячеек». В подобной структуре узлы плетения равномерно отстоят один от другого на базовой траектории (на нити плетения) и расстояния между парами узловых точек, образующих узел плетения одинаковы. Вследствие этого можно выделить следующие чередующиеся «слои» базовых и пресекающих траекторий (слои плетения), которые представляют собой симметрично разнесенные линии на поверхности эллипсоида или шара. На рис. 12г показана однослойная ячеистая квазирегулярная структура с совпадающими узловыми точками узлов плетения (эти точки расположены на фрагменте поверхности эллипсоида или шара). На рис. 12д изображены несколько однослойных квазирегулярных структур плетения, расположенных на опасно близком расстоянии друг от друга.

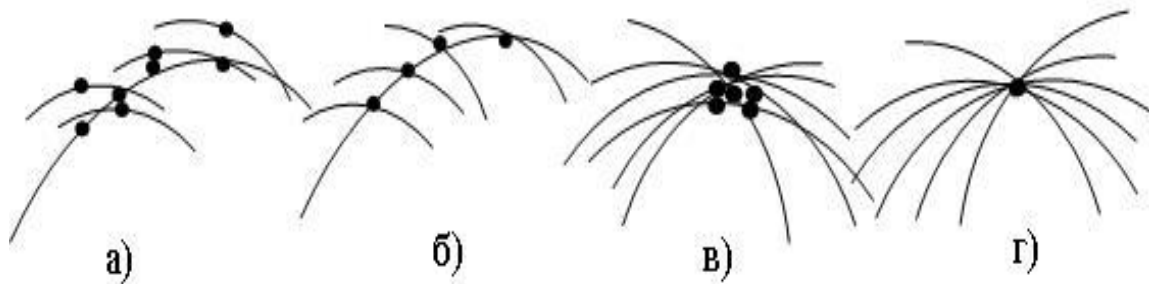


Рис. 13. К пояснению вариантов элементарных структур объемного плетения: а) структура плетения «на одной нити»; б) структура плетения «на одной нити» с совпадающими точками узлов плетения; в) структура близкая к звездообразной; г) звездообразная структура.

В структурах расположения опасных участков траекторий, входящих в зону поликонфликтов можно выделить несколько элементарных структур, которые представлены на рис. 13. В частности, на рис. 13а показана произвольная структура, образованная узлами конфликтов, создаваемыми на одной базовой траектории (структура «плетения на одной нити»). На рис. 13б изображена структура плетения на одной нити с совпадающими точками узлов плетения. На рис. 13в показана структура плетения близкая к звездообразной (каждая узловая точка одного узла конфликтов находится на опасном расстоянии от нескольких узловых точек других узлов конфликтов). На рис. 13г представлена звездообразная структура (все узловые точки совпадают).

Следует отметить, что предложенный метод генерации поликонфликтной зоны представляет собой последовательное заполнение ее связанными между собой узлами конфликтов. Каждый новый генерируемый узел связан, по меньшей мере, с одним другим узлом конфликтов зоны. При этом он может быть связан и с большим числом узлов этой поликонфликтной зоны.

**3. Математическая модели и алгоритмы расчетов, обеспечивающие «шаг плетения».** Ниже представлены два метода реализации шага плетения, которые могут быть положены в основу соответственно двух модификаций предлагаемого метода генерации поликонфликтной зоны.

**3.1 Реализации шага плетения на основе модели, связывающей параметры генерируемой орбиты с параметрами базовой и характеристиками, определяющими расположение участка генерируемой орбиты относительно заданного («опорного») участка базовой орбиты.** На примере этого метода реализации шага плетения выше было дано общее описание генерации предлагаемого метода объемного плетения для генерации поликонфликтной зоны. Как отмечалось, на каждом шаге исходными данными являются следующие: орбитальные параметры  $e_k, p_k, i_k, \Omega_k, \omega_k$  базового орбитального объекта  $k$ ; значение угла  $\vartheta_{Pk}$ , определяющее положение узловой точки  $P_k$  объекта  $k$  относительно перигея; значение угла  $\alpha_{kl}$  между орбитальными плоскостями объектов  $k$  и  $l$ ; разность значений  $\Delta_{rp}$  длин радиус-векторов  $r_{Pk}$  и  $r_{Pl}$  узловых точек  $P_k$  и  $P_l$  на опасных участках орбиты базовой траектории объекта  $k$  и генерируемой траектории объекта  $l$  (рис. ). Искомые значения – следующие параметры орбиты объекта  $l$ :  $e_l, p_l, i_l, \Omega_l, \omega_l$ , а также значение угла  $\vartheta_{Pl}$  (рис. 11а), задающее на орбите объекта  $l$  положение точки  $P_l$  (истинной аномалии узловой точки  $P_l$ ). Для их нахождения решается система из шести уравнений, представленных ниже

$$\alpha_{kl} = \arccos(|A_k A_l + B_k B_l + C_k C_l|)$$

$$\theta_{Pk} = \arctg\left(-\frac{A_l m_{k1,1} + B_l m_{k2,1} + C_l m_{k3,1}}{A_l m_{k1,2} + B_l m_{k2,2} + C_l m_{k3,2}}\right)$$

$$\theta_{Pl} = \arctg\left(-\frac{A_k m_{l1,1} + B_k m_{l2,1} + C_k m_{l3,1}}{A_k m_{l1,2} + B_k m_{l2,2} + C_k m_{l3,2}}\right)$$

$$x_{Pl} = \frac{p_l}{1 + e_l \cos \vartheta_{Pl}} [\cos \Omega_l \cos(\vartheta_{Pl} + \omega_l) - \sin \Omega_l \sin(\vartheta_{Pl} + \omega_l) \cos i_l]$$

$$y_{Pl} = \frac{p_l}{1 + e_l \cos \vartheta_{Pl}} [\sin \Omega_l \cos(\vartheta_{Pl} + \omega_l) - \cos \Omega_l \sin(\vartheta_{Pl} + \omega_l) \cos i_l]$$

$$z_{Pl} = \frac{p_l}{1 + e_l \cos \vartheta_{Pl}} [\sin(\vartheta_{Pl} + \omega_l) \sin i_l].$$

В это системе уравнений выражения, определяющие  $A_k, B_k, C_k, m_{k1,1}, m_{k2,1}, m_{k3,1}, m_{k1,2}, m_{k2,2}, m_{k3,2}$ , а также выражения определяющие  $A_l(i_l, \Omega_l), B_l(i_l, \Omega_l)$

,  $C_1(i_1, \Omega_1)$ ,  $m_{11,1}(i_1, \Omega_1, \omega_1)$ ,  $m_{12,1}(i_1, \Omega_1, \omega_1)$ ,  $m_{13,1}(i_1, \Omega_1, \omega_1)$ ,  $m_{11,2}(i_1, \Omega_1, \omega_1)$ ,  $m_{12,2}(i_1, \Omega_1, \omega_1)$ ,  $m_{13,2}(i_1, \Omega_1, \omega_1)$ , которые зависят от искомым значений, приведены выше. В приведенной системе уравнений  $x_{P_1}$ ,  $y_{P_1}$ ,  $z_{P_1}$  – координаты точки  $P_1$  в геоцентрической экваториальной системе, определенные учетом того, что радиус-векторы  $r_{P_k}$  и  $r_{P_1}$  совпадают, на основе следующих выражений

$$\begin{aligned} x_{P_1} &= (r_{P_k} + \Delta_{rP}) [\cos \Omega_k \cos(\vartheta_{P_k} + \omega_k) - \sin \Omega_k \sin(\vartheta_{P_k} + \omega_k) \cos i_k] \\ y_{P_1} &= (r_{P_k} + \Delta_{rP}) [\sin \Omega_k \cos(\vartheta_{P_k} + \omega_k) - \cos \Omega_k \sin(\vartheta_{P_k} + \omega_k) \cos i_k] \\ z_{P_1} &= (r_{P_k} + \Delta_{rP}) [\sin(\vartheta_{P_k} + \omega_k) \sin i_k]. \end{aligned}$$

После нахождения значений пяти перечисленных выше искомым параметров для описания сгенерированного узла конфликтов, образуемого участками траекторий объектов  $k$  и  $l$ , рассчитывается ряд его характеристик. В том числе – значения истинных аномалий, определяющих начальные и конечные точки опасного участка объектов  $k$  и  $l$  (на рис. 10б это точки  $G_{bk}$ ,  $G_{ek}$  для объекта  $k$ , а на рис. 10в – точки  $G_{bl}$ ,  $G_{el}$  для объекта  $l$ ). А также другие характеристики узла.

### 3.2 Метод реализации шага плетения на основе последовательности операций определения значений параметров генерируемой орбиты, обеспечивающих конфигурацию и расположение ее участка относительно базового (опорного) участка другой орбиты.

Описанный выше метод реализации шага генерации зоны поликонфликтов не дает возможности некоторой вариации орбитальных параметров генерируемой траектории. Такую возможность предоставляет метод, описанный в данном подразделе. Он предполагает алгоритм действий, перечисленных ниже.

1. Задаются (или определяются на предыдущем шаге планирования) значения пяти параметров базового орбитального объекта  $k$ :  $e_k$ ,  $p_k$ ,  $i_k$ ,  $\Omega_k$ ,  $\omega_k$ . Выбирается значение угла  $\vartheta_{P_k}$ , определяющего положение узловой точки  $P_k$  на этой траектории.

2. Рассчитывается значение  $r_{P_k} = \frac{p_k}{1 + e_k \cos \vartheta_{P_k}}$ . Выбирается значение

разности  $\Delta_{rP}$  длин радиус-векторов узловых точек  $P_k$  и  $P_1$ . Определяется длина радиус-вектора узловой точки  $P_1$  на генерируемой орбите:

$$r_{P_1} = r_{P_k} + \Delta_{rP}.$$



3. Из выражения  $r_{P_1} = \frac{P_1}{1 + e_1 \cos \vartheta_{P_1}}$  определяются значения  $r_1$  и  $e_1$  (при

этом одно из них выбирается в допустимом диапазоне, а другое – рассчитывается).

4. Задаются значения угла  $\vartheta_{Pk}(i_k, \Omega_k, \omega_k, i_1, \Omega_1, \omega_1)$ , задающего положение узловой точки  $P_1$  на генерируемой орбите, и угла  $\alpha_{kl}(i_k, \Omega_k, i_1, \Omega_1)$  между орбитальными плоскостями объектов  $k$  и  $l$ . С их использованием определяются значения параметров  $i_1, \Omega_1, \omega_1$  (при этом значение одного из них выбирается в диапазоне допустимых значений, а два других – рассчитываются).

5. Для сгенерированного узла рассчитываются его характеристики.

**4. Концепции анализа поликонфликтной зоны и возникающих в ней поликонфликтных ситуаций.** Как отмечалось выше, зона поликонфликтов охватывает все опасные участки группы связанных между собой узлов конфликтов (узел множественных поликонфликтов). Если представлять ее, например, в виде параллелепипеда (рис. 9), то его форма определяется с использованием минимальных  $X_{min}, Y_{min}, Z_{min}$  и максимальных  $X_{max}, Y_{max}, Z_{max}$  значений координат точек концов опасных участков траекторий, входящих в узлы конфликтов, создающих узел поликонфликтов. Размеры параллелепипеда несколько увеличивают за счет добавления к значениям  $X_{min}, Y_{min}, Z_{min}, X_{max}, Y_{max}, Z_{max}$  поправок с соответствующим знаком, учитывающих возможные отклонений объектов от рассматриваемых траекторий.

Моделируя вековые изменения сгенерированных траекторий (например, с использованием относительно несложных моделей, представленных, в работе [10]), можно исследовать эволюцию зоны конфликтов. В том числе, рассчитывать ее текущие характеристики и оценивать потенциальный уровень конфликтности с использованием моделей и методов, предложенных в работах [2,3,7,9].

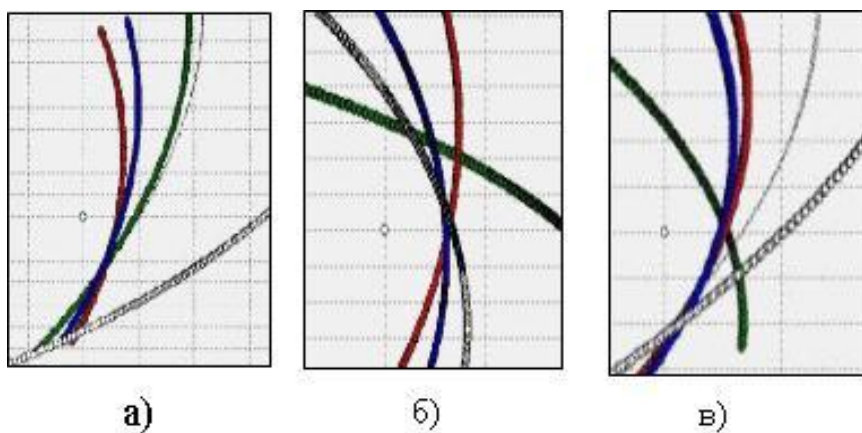


Рис. 14. Примеры сгенерированных узлов поликонфликтов: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

Исследование различных вариантов протекания ситуаций поликонфликтных сближений орбитальных объектов сгенерированной поликонфликтной группы реализуются следующим образом. На некоторый момент времени  $t$ , для которого определены опасные участки траекторий, входящие в зону поликонфликтов, выбираются местоположения орбитальных объектов на траекториях (внутри или вне зоны конфликтов). Это удобно сделать, зная значения истинных аномалий, соответствующие граничным точкам опасных участков узла конфликтов и истинной аномалии узловой точки (например, это углы  $\vartheta_{bk}$ ,  $\vartheta_{ek}$  и  $\vartheta_{pk}$  соответственно для объекта  $k$ ). Ориентируясь на эти значения, можно задать значение истинной аномалии  $\vartheta_{tk}$ , определяющие положение объекта  $k$  в заданный момент времени  $t$ . С использованием значения  $\vartheta_{tk}$  для объекта  $k$  подбирается соответствующее значение момента времени прохождения перигея  $\tau_k$  (в частности, на ближайшем периоде). Варьируя композиции начальных расположений орбитальных объектов, исследуется прохождение ими зоны поликонфликтов. Подчеркнем, что зона поликонфликтов генерировалась без учета периодических изменений параметров орбиты, а моделирование движения объектов через эту зону может быть с использованием достаточно точных моделей, которые учитывают эти изменения.

В данной работе не представлены результаты исследований различных поликонфликтных групп объектов. Только в качестве иллюстрации предложенного метода генерации поликонфликтной зоны на рис. 14 показаны варианты расположения опасных участков траекторий трех сгенерированных поликонфликтных групп. (рис. 14а, 14б, 14в соответственно).

**Выводы.** Предложенный подход к исследованию поликонфликтных сближений орбитальных объектов может стать полезным дополнением к уже используемым подходам и методам анализа поликонфликтов на орбитах. Генерация зоны поликонфликтов может быть использована для решения широко круга исследовательских и проектных задач, некоторые из которых перечислены далее. Во-первых, это развитие методов прогноза поликонфликтных сближений. Во-вторых, это задачи планирования маневрирования космических аппаратов с целью обхода поликонфликтной зоны или безопасного прохода через нее. В-третьих, это задачи планирования действий по быстрой очистке поликонфликтных зон от орбитальных объектов.

### Библиографические ссылки

1. Space debris [электр. текст] Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/Space-debris>.
2. Лабуткина Т.В. Информационная система для задач анализа конфликтности многоэлементного множества орбитальных объектов./ Т.В. Лабуткина, А.Н. Петренко // Научно-технический журнал «Радиоэлектронні і комп'ютерні системи». № 3 (62), 2013. С. 92-101.
3. Лабуткина Т.В. Быстрый метод прогноза опасных сближений орбитальных объектов и оценка расстояния сближения /Т. В Лабуткина, А. Н. Петренко // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2012. – Т. XIV. – С. 28-40.
4. Бордовицина Т.В. Численное моделирование динамики околоземных космических объектов искусственного происхождения с использованием параллельных вычислений. / Т.В. Боровицына, А.Г. Александрова, И.Н. Чувашов // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. 2011, № 4 (19). С. – 34-48.
5. Назаренко А. И. Моделирование эволюции распределения техногенных частиц и объектов/ А. И. Назаренко // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). – М.: Космичинформ, 1995. – С. 104-129.
6. Назаренко А.И. Моделирование техногенного загрязнения околоземного космического пространства. // Околоземная астрономия XXI века. – М: ГЕОС, 2001. – С.80-91.
7. Кондрашин М.А. Разработка алгоритма выявления объектов, потенциально опасных для управляемых космических аппаратов / М.А Кондрашин // Космонавтика и ракетостроение. – 2009. – № 1(58). – С. 153-157.
8. Баранов А.А. Методика выявления и оценки сближений космического аппарата с объектами космического мусора./ А.А. Баранов, М.А. Каратунов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2016.– #4, С. 1-16.
9. Усиченко В.И. Прогнозирование столкновений космических объектов методом выделения эквидистантных точек на эллиптических орбитах. / В.И. Усиченко, А.В. Крюков, Д.Г. Грошелев // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка». – 2015. – Випуск 18, том 1. – С. 156-161.
10. Основы теории полета и элементы проектирования искусственных спутников Земли. М.К. Тихонравов, И.К. Бажанов, О.В. Гурко – М.: Машиностроение, 1974. – С. 332.