

УДК 623.462; 629.7.01

doi: 10.53816/20753608_2025_4_97

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ТИПИЗАЦИИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОМПОНОВОК ОБРАЗЦОВ РАКЕТНОГО ОРУЖИЯ**

**RESEARCHING THE POSSIBILITY OF USING ALGORITHMS
OF CLUSTERIZATION FOR THE TYPIFICATION
OF AERODYNAMIC CONFIGURATIONS OF MISSILE WEAPON**

По представлению академика РАРАН В.М. Кашина

Р.В. Василихин, Л.А. Лантева, Д.Ю. Тищенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана

R.V. Vasilikhin, L.A. Lapteva, D.Y. Tishchenko

В статье рассмотрена проблема формирования исходных данных для проведения внешнебаллистического проектирования летательных аппаратов, а именно формирования аэродинамических характеристик (АДХ) проектируемого летательного аппарата. Предложен подход к формированию АДХ, приведен пример использования предлагаемого подхода, дана оценка применимости предлагаемого подхода к решаемой задаче.

Ключевые слова: проектирование летательных аппаратов, внешнебаллистическое проектирование, кластеризация, кластерный анализ, ракетное оружие, вооружение и военная техника.

The article considers the problem of forming initial data for the design of external ballistics of aircraft, namely, the formation of aerodynamic characteristics of the projected aircraft. An approach to the formation of aerodynamic characteristics is proposed, an example of using the proposed approach is given, and an assessment of the applicability of the proposed approach to the problem being solved is given.

Keywords: aircraft design, external ballistics design, clusterization, cluster analysis, missile weapons, weapons and military equipment.

Одна из проблем, возникающих при формировании исходных данных для внешнебаллистического проектирования образцов ракетного оружия, связана с определением аэродинамических характеристик. Обычно, в первом приближении определяют только коэффициент лобового сопротивления с помощью соответствующих функций, таких как функция аэродинамического сопротивления 1943 года, закон Сиауччи, закон Гарнье-Дюпюи (закон 1930 года) и другие.

В настоящее время существуют различные программные продукты, позволяющие с высокой точностью получать значения аэродинамических характеристик летательных аппаратов. Однако, основная проблема на этапе внешнебаллистического проектирования заключается в том, что внешний облик проектируемого образца на данном этапе не известен, что исключает возможность определения его аэродинамических характеристик.

Существует принцип аэродинамического подобия [1] — два объекта, имеющие схожие внешние обводы, обладают и схожими аэродинамическими характеристиками. Это значит, что при проведении внешнебаллистического проектирования нового летательного аппарата имеется возможность заимствовать АДХ существующего аппарата, внешние обводы которого наиболее близки к внешним обводам проектируемого образца. Под «летательными аппаратами» в настоящей работе понимаются образцы тактических управляемых ракет четырех классов: «поверхность-поверхность», «поверхность-воздух», «воздух-поверхность» и «воздух-воздух». В работе рассматриваются образцы, имеющие два пояса несущих поверхностей, при этом в каждом поясе расположено две или четыре консоли.

Поскольку на раннем этапе проектирования образца неизвестны его внешние обводы, в статье [2] было выдвинуто и обосновано суждение о том, что в этом случае имеется возможность опираться на те или иные тактико-технические характеристики с целью выбора характерных внешних обводов. Например, у большинства образцов ракетного оружия, обладающих головкой самонаведения, работающей в оптическом диапазоне длин волн, носовая часть имеет сферическую форму.

Основной целью работы, описанной в настоящей статье, является выявление возможности применения существующих алгоритмов кластеризации для типизации внешних обводов различных образцов.

Под кластеризацией понимается процедура группирования множества объектов по какому-либо признаку их схожести друг на друга, т.е. объединение отдельных объектов в кластеры (группы). При решении задачи на ЭВМ объектами являются n -мерные векторы, а в качестве признака схожести выступает равенство (с заданной заданной или определяемой в процессе кластеризации точностью) соответствующих координат этих векторов.

В статье [2] было предложено объединить в группы существующие образцы по принципу схожести их внешних обводов. Схожесть внешних обводов образцов определяется по равенству (с заданной точностью) их геометрических параметров. Описанная задача является задачей кластеризации. Внутри каждой группы

путем осреднения геометрических параметров выделяется некоторая типовая компоновка. При этом считается, что АДХ каждой компоновки образца из группы близки к АДХ типовой компоновки.

Также АДХ типовых компоновок ракетного оружия могут использоваться на практике для быстрой оценки тактико-технических характеристик новых образцов зарубежной ракетной техники, информация о которых зачастую ограничена рекламными заявлениями разработчиков.

Для решения задачи кластеризации на ЭВМ необходимо представить внешние обводы каждого образца в виде n -мерного вектора. Внешние обводы образца описываются определенным количеством геометрических параметров. В статье [2] для описания обводов рассматриваемых образцов было выбрано 15 геометрических параметров (рис. 1):

- калибр (наибольший диаметр фюзеляжа) образца d ;
- длина фюзеляжа образца L_{ϕ} ;
- длина носовой части фюзеляжа образца $L_{\text{нос}}$;
- угол наклона касательной к образующей носовой части в точке перехода носовой части в цилиндрический участок фюзеляжа θ ;
- радиус сферического затупления носовой части $r_{\text{сф}}$;
- размахи консолей несущих поверхностей первого l_I и второго l_{II} поясов;
- бортовые хорды консолей несущих поверхностей первого $b_{\phi I}$ и второго $b_{\phi II}$ поясов;
- концевые хорды консолей несущих поверхностей первого b_{1I} и второго b_{1II} поясов;
- координаты начала бортовых хорд консолей несущих поверхностей первого x_I и второго x_{II} поясов;
- углы стреловидности консолей несущих поверхностей по линиям середин хорд первого $\chi_{0,5I}$ и второго $\chi_{0,5II}$ поясов.

Расчет АДХ предполагается производить по эмпирико-аналитическим методикам, приведенным в [3], с использованием специализированных программных средств [4, 5], разработанных на кафедре СМ6 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для расчёта по упомянутой методике необходимо иметь следующие безразмерные параметры (рис. 1):

- удлинение фюзеляжа образца $l_{\phi} = L_{\phi} / d$;

– удлинение носовой части фюзеляжа образца $l_{\text{нос}} = L_{\text{нос}}/d$;

– относительный радиус сферического затупления носовой части $\bar{r}_{\text{сф}} = 2r_{\text{сф}}/d$;

– относительные координаты начал бортовых хорд консолей несущих поверхностей первого $\bar{x}_{\text{бI}} = x_{\text{бI}}/L_{\text{ф}}$ и второго $\bar{x}_{\text{бII}} = x_{\text{бII}}/L_{\text{ф}}$ поясов;

– относительные диаметры консолей несущих поверхностей первого $\bar{d}_I = d/l_{\text{кI}}$ и второго $\bar{d}_{II} = d/l_{\text{кII}}$ поясов;

– обратные сужения $z = 1/h$ (сужение h представляет собой отношение длины бортовой хорды консоли к длине ее концевой хорды) консолей несущих поверхностей первого z_I и второго z_{II} поясов;

– удлинение консолей несущих поверхностей первого $l_{\text{кI}} = l_{\text{кI}}^2/S_{\text{кI}}$ и второго $l_{\text{кII}} = l_{\text{кII}}^2/S_{\text{кII}}$ поясов.

Для полного описания образца с точки зрения его внешних обводов необходимо иметь 14 параметров. Таким образом, внешние обводы каждого образца могут быть представлены 14-мерным вектором, среди компонент которого:

– удлинение фюзеляжа образца $l_{\text{ф}}$;

– удлинение носовой части фюзеляжа образца $l_{\text{нос}}$;

– угол наклона касательной к образующей носовой части в точке перехода носовой части в цилиндрический участок фюзеляжа θ ;

– относительный радиус сферического затупления носовой части $\bar{r}_{\text{сф}}$;

– относительные координаты начал бортовых хорд консолей несущих поверхностей первого $\bar{x}_{\text{бI}}$ и второго $\bar{x}_{\text{бII}}$ поясов;

– относительные диаметры консолей несущих поверхностей первого \bar{d}_I и второго \bar{d}_{II} поясов;

– обратные сужения консолей несущих поверхностей первого z_I и второго z_{II} поясов;

– удлинение консолей несущих поверхностей первого $l_{\text{кI}}$ и второго $l_{\text{кII}}$ поясов.

– углы стреловидности консолей по линиям средин хорд $\chi_{0,5I}$ и $\chi_{0,5II}$.

В работе, описанной в настоящей статье, были рассмотрены следующие алгоритмы кластеризации:

– K-Means;

– Affinity propagation;

– Mean-shift;

– Spectral clustering;

– Ward hierarchical clustering;

– Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN);

– Hierarchical DBSCAN (HDBSCAN);

– Ordering Points To Identify the Clustering Structure (OPTICS).

Применения указанных алгоритмов кластеризации ко множеству рассматриваемых образцов было реализовано с помощью языка программирования Python [6] с использованием библиотеки для работы с методами машинного обучения scikit-learn [7].

В документации к библиотеке [8], а также на различных интернет-ресурсах (например, [9]) имеются рекомендации по использованию конкретных алгоритмов кластеризации для различных типов данных. Для рассматриваемой задачи проблематично выбрать один алгоритм ввиду высокой размерности векторов.

В ходе проведенного исследования было выявлено, что в условиях разнородности кластеризируемых данных алгоритмы K-Means и Mean-shift позволяют получить удовлетворительный результат.

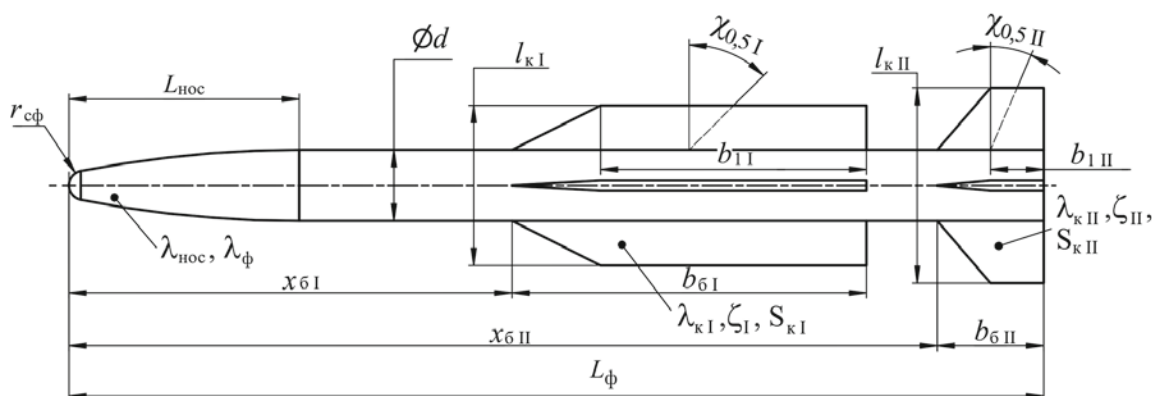


Рис. 1. Геометрические параметры образца

Основное отличие этих алгоритмов друг от друга заключается в том, что алгоритм K-Means разбивает множество данных на заранее заданное количество кластеров. Алгоритм Mean-shift самостоятельно определяет количество кластеров, на которые необходимо разбить множество данных, но использует для этого другой параметр, называемый полосой пропускания или пропускной способностью.

В случае K-Means в рассматриваемую область случайным образом «выбрасываются» точки, являющиеся центрами кластеров, и количество которых равно количеству указанных кластеров. Каждый объект в наборе данных (вектор) относится к тому кластеру, центр которого расположен к этому вектору ближе всего. Для измерения расстояния используются формулы евклидовой геометрии. После отнесения векторов к кластерам вычисляются новые положения их центров. Для этого каждый центр перемещается в точку, координаты которой получены путем осреднения соответствующих координат входящих в кластер векторов. Далее каждый вектор вновь относится к тому кластеру, центр которого, после их перемещения, расположен к этому вектору ближе всего. Процедура отнесения векторов к кластерам и перемещения центров кластеров продолжается до тех пор, пока изменение положений центров кластеров не станет незначительным. Этот алгоритм прост в реализации и достаточно эффективен для решения рассматриваемой задачи, однако результат зависит от выбора числа кластеров и чувствителен к начальному положению центров кластеров, выбираемых случайно при каждом новом запуске алгоритма. Для решения последней проблемы в библиотеке `scikit-learn` предусмотрен специальный параметр для этого алгоритма, фиксирующий начальное положение центров кластеров.

Основная идея алгоритма Mean-shift — сдвигать каждую точку центра кластера к области с максимальной плотностью. Процесс кластеризации протекает следующим образом. Каждый вектор представляется точкой, которая, в свою очередь, является центром кластера (то есть, на первой итерации число кластеров равно числу кластеризируемых векторов). На основании заданной полосы пропускания центры кластеров перемещаются в рассматриваемом пространстве в сторону областей высокой плот-

ности. Под высокой плотностью в этом случае понимается размещение относительно большого количества точек в относительно малом объеме, а под полосой пропускания понимается радиус круглой области вокруг центра кластера, который определяет, где будет происходить сдвиг этого центра. Если несколько центров кластеризации сближаются достаточно сильно, то они объединяются в один центр. Сдвиг центров происходит до тех пор, пока изменение их положений не станет незначительным, то есть, пока центры не сходятся к локальному максимуму функции плотности. В результате алгоритмом будут обнаружены области высокой плотности, каждая из которых представляет собой кластер. Хотя этот алгоритм и позволяет обрабатывать кластеры различной формы, он чувствителен к выбору полосы пропускания, а также склонен к ошибкам кластеризации, связанных с поиском локального максимум функции плотности, а не глобального.

Для дальнейших исследований было принято решение использовать алгоритм K-Means. Этот алгоритм, в отличие от Mean-shift, относительно прост в использовании и позволяет получить рациональный результат как по количеству кластеров, так и по качеству кластеризации в целом.

Как было указано ранее, для составления множества образцов, подвергаемых кластеризации, были рассмотрены различные отечественные и зарубежные образцы четырех классов:

- «воздух-воздух»;
- «воздух-поверхность» (включая образцы противотанковых управляемых ракет, запускаемых с вертолетов);
- «поверхность-поверхность» (только образцы противотанковых управляемых ракет);
- «поверхность-воздух».

Внутри каждого класса рассматривались образцы малой, средней и большой дальностей. Исключение составляют образцы класса «поверхность-поверхность» — как указано выше, рассматривались образцы только противотанковых управляемых ракет, которые могут быть использованы лишь на малой дальности.

Множество составлялось таким образом, чтобы в нем содержались образцы всех указанных классов и всех указанных дальностей. При этом учитывалось ранее приведённое

условие — образцы должны иметь два пояса несущих поверхностей и по две или четыре консоли в каждом поясе. Кроме того, их изображения должны быть представлены в открытом доступе. Таким образом, были отобраны 49 образцов, отвечающие указанным требованиям и представленные в энциклопедии [10], и составлены их эскизы, при этом внешние облики некоторых

образцов незначительно упрощены для обеспечения возможности применения программных средств [4, 5]. По составленным эскизам определены геометрические параметры образцов — компоненты 14-мерных векторов, являющиеся объектами кластеризации. На рис. 2 приведены изображения рассматриваемых образцов с указанием их наименований (или индексов).

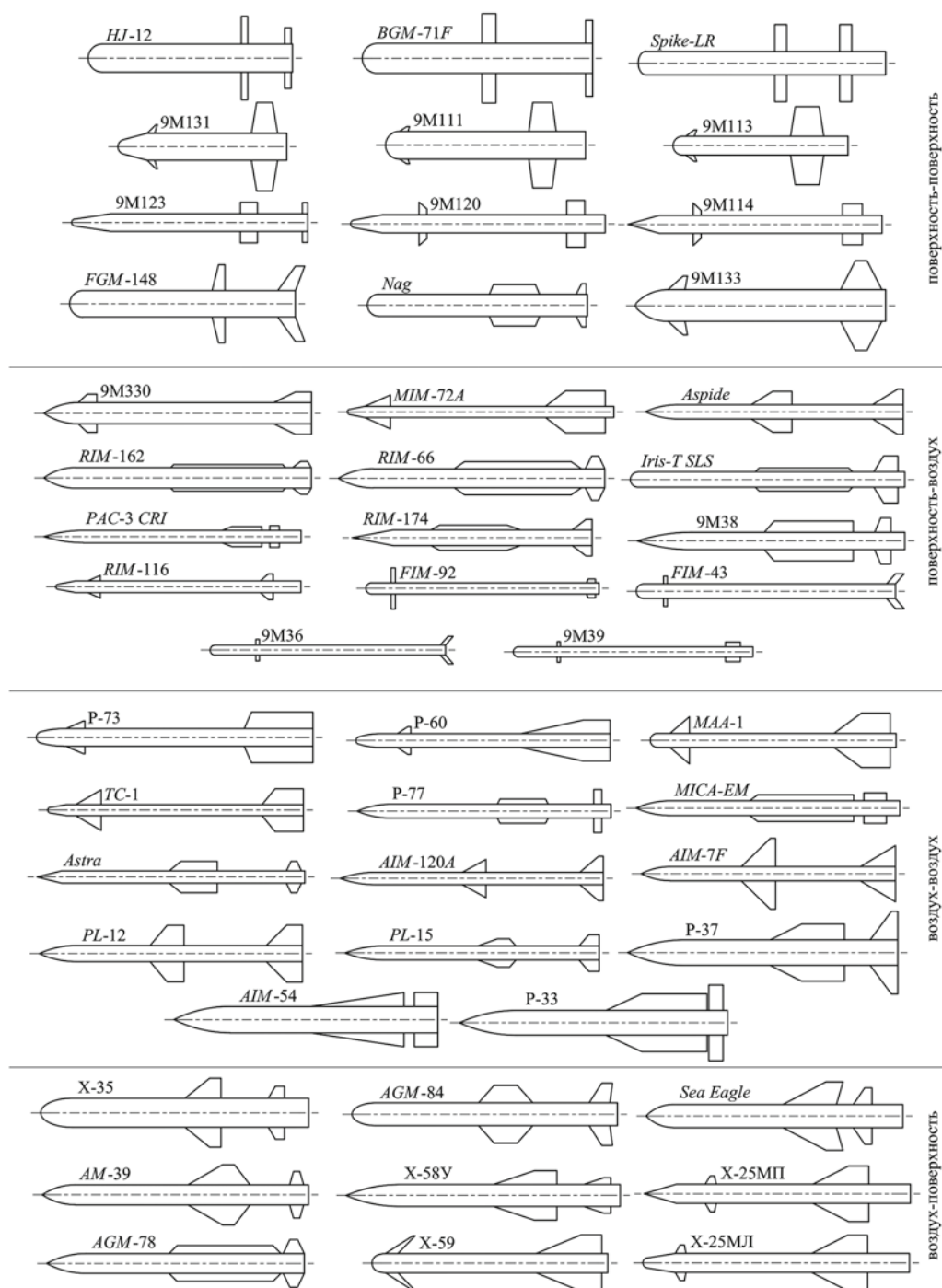


Рис. 2. Эскизы рассматриваемых образцов

В результате применения выбранного алгоритма к рассматриваемому множеству образцов было установлено, что алгоритм, в целом, справляется с поставленной задачей. Выделенные группы действительно содержат образцы, схожие по внешним обводам. Также существуют группы, состоящие всего из одного образца, внешние обводы которого уникальны. Однако алгоритм до-

пускает попадание в некоторое количество групп таких образцов, которые не имеют внешнего сходства с остальными образцами этой группы, так называемые, «шумовые» образцы.

На рис. 3 приведен результат кластеризации рассматриваемого множества образцов в виде сгруппированных эскизов образцов. Также представлены типовые аэродинамические

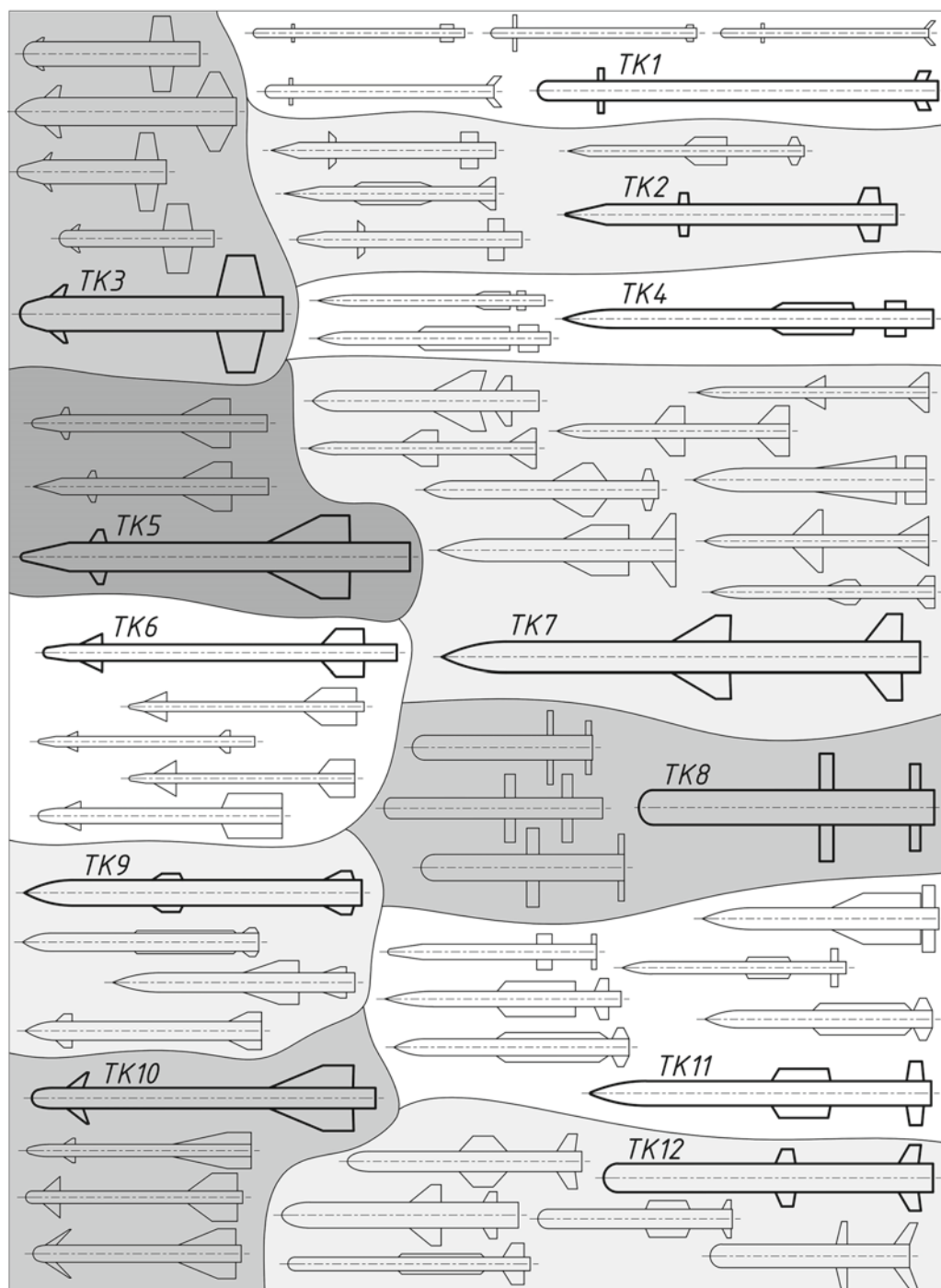


Рис. 3. Результат применения алгоритма K-Means к рассматриваемому множеству

компоновки, полученные путем осреднения соответствующих геометрических параметров образцов внутри каждой группы.

По предварительным оценкам проблема с «шумовыми» образцами может быть решена двухэтапной кластеризацией. После кластеризации необходимо в ручном режиме или с применением другого алгоритма или метода анализа провести оценку результата и переместить «шумовые» образцы в соответствующие группы или выделить для них отдельную группу. Данное предположение будет проверено в ходе проведения дальнейших этапов работы по рассматриваемой теме.

Таким образом, результат кластеризации множества внешних обводов образцов оказался неудовлетворительным для решения рассматриваемой задачи. Дальнейшая работа по рассматриваемой теме будет направлена на улучшение качества кластеризации путем доработки алгоритмов или введением двухэтапного анализа.

Список источников

1. Юрьев Б.Н. Экспериментальная аэродинамика. Часть 1. Теоретические основы экспериментальной аэродинамики. Москва; Ленинград: НКАП СССР, государственное издательство оборонной промышленности, 1939. 314 с.
2. Тищенко Д.Ю., Лаптева Л.А., Василихин Р.В. Концепция формирования аэродинамических характеристик для внешнебаллистического проектирования образцов ракетного оружия различных классов на ранних этапах разработки // «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2024. Т. 1. С. 205–211.
3. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппара-

тов: учеб. пособие для ВУЗов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1973. 616 с.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613387. Российская федерация. AeroBDSM (SDK): библиотека подпрограмм для аэродинамического расчета летательных аппаратов: № 2022684196: заявл. 07.12.2022; опубл. 14.02.2023 / Л.А. Лаптева, Д.Ю. Тищенко [и др.].

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023680796. Российская Федерация. AeroBDSM (OOP): объектно-ориентированное программное обеспечение для аэродинамического расчета летательных аппаратов: № 2023668171; заявл. 23.08.2023; опубл. 05.10.2023 / Лаптева Л.А., Тищенко Д.Ю [и др.].

6. Python // Welcome to python. URL: <https://www.python.org/>. Режим доступа: свободный (дата обращения: 19.04.2024).

7. Scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 1.6.0 documentation // Scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html>. Режим доступа: свободный (дата обращения: 27.09.2024).

8. Clustering — scikit-learn 1.6.0 documentation // Scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html#k-means>. Режим доступа: свободный (дата обращения: 27.09.2024).

9. Открытый курс машинного обучения. Тема 7. Обучение без учителя PCA и кластеризация // Хабр [электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/ods/articles/325654/>. Режим доступа: свободный (дата обращения: 27.09.2024).

10. Описания и технические характеристики ракет // Ракетная техника [электронный ресурс]. URL: <https://missilery.info>. Режим доступа: свободный (дата обращения: 09.11.2023).