

Исследование рассеивания и аэродинамического сопротивления модифицированных пуль при дозвуковых скоростях полета на баллистической трассе

© С.Н. Илюхин, В.О. Москаленко, В.В. Булавина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предметом работы являются экспериментальные исследования и анализ результатов влияния предложенных модификаций пневматической пули на точностные параметры стрелковой системы с дозвуковой начальной скоростью. Представлены варианты модернизации пули с плоской головной частью для пневматического оружия. Подробно рассмотрены результаты внешнебаллистических испытаний, проведенных на баллистической трассе кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приведено теоретическое обоснование полученной при анализе результатов стрельб физической картины взаимодействия пули с воздушной средой. Описана полученная корреляция характеристик рассеивания неуправляемых летательных аппаратов в зависимости от типа модификации их аэродинамической формы. На основании полученных данных определены модификации формы пули, обеспечивающие не только снижение аэродинамического сопротивления, но и некоторое снижение рассеивания при проведении стрельб.

Ключевые слова: баллистическая трасса, пневматическое оружие, пуля, рассеивание, аэродинамическое сопротивление

Введение. Точность попадания летательного аппарата (ЛА) в заданную область пространства является основополагающим параметром любой баллистической задачи и определяет эффективность ЛА. Точность управляемых ЛА повышается благодаря совершенствованию соответствующих систем наведения, стабилизации, коррекции. Точность неуправляемых ЛА определяется исключительно условиями пуска, параметрами ЛА и действующими возмущениями. Поэтому снижение параметров рассеивания остается основной задачей при разработке формы и конструкции новых образцов неуправляемых ЛА, к которым, в частности, относятся пули для пневматического оружия.

В ряде различных исследований [1–3] обосновано, что наименьшими параметрами рассеивания среди пуль для пневматического оружия отличаются пули с плоской головной частью и полый расширяющейся хвостовой частью, получившие наименование Match (рис. 1).

Однако данные образцы обладают и наибольшим аэродинамическим сопротивлением по сравнению с другими типами пуль для пневматического оружия, что приводит к ускоренной потере кинети-

ческой энергии пули и снижению дальности стрельбы. Причем пули с наименьшим аэродинамическим сопротивлением имеют худшие показатели рассеяния при стрельбе.



Рис. 1. 3D-модель пневматической пули типа Match

Цель настоящей работы — модификация аэродинамической формы пули типа Match для снижения ее аэродинамического сопротивления при сохранении высокой точности стрельбы.

Экспериментальное исследование. В качестве основного метода исследования выбран метод аэродинамического сопротивления и рассеивания модифицированных пуль при их стрельбе на баллистической трассе. Преимуществами данного метода являются:

- возможность исследования полноценного процесса движения и определения суммарных характеристик в отличие от цифрового моделирования;
- относительная простота реализации эксперимента и обработки полученной информации;
- возможность проведения большого числа однотипных испытаний при наличии соответствующего количества ЛА.

Стрелковые эксперименты двух типов проводили на большой баллистической трассе кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им Н.Э. Баумана, длина которой составляла 33,8 м, диаметр — 0,8 м (рис. 2).

Эксперименты первого типа с использованием двух длинноствольных пусковых установок различной мощности и параметров ствола заключались в проведении серии опытных стрельб по определению параметров рассеивания в мишени [4, 5] на дистанции 9 м. Размер каждой выборки составлял 10 выстрелов. Параметром точности системы являлось среднеквадратичное отклонение (СКО) точек попадания пуль в мишень.

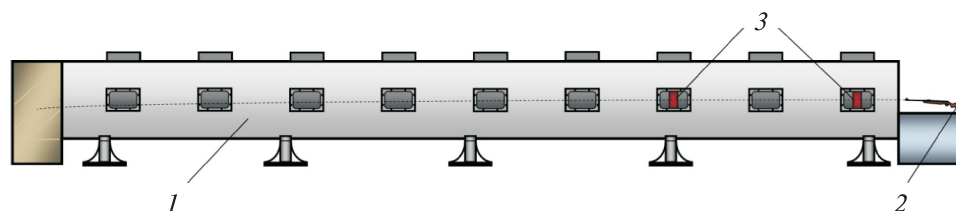


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — баллистическая труса; 2 — пусковая установка; 3 — хронограф

Обработку экспериментальных данных проводили следующим образом. На полученном листе мишени с точками попаданий отмечали систему координат и каждой точке попадания присваивали порядковый номер $i = 1, \dots, 10$. Для каждой i -й точки измеряли ее координаты x_i, y_i в принятой системе координат. Эти координаты выступали в качестве исследуемых величин. Закон распределения результатов стрельбы принимали нормальным. Далее вычисляли оценки математического ожидания $M_{x,y}$ и оценки дисперсии $D_{x,y}$. Путем извлечения квадратного корня из дисперсии определяли оценки $\sigma_{x,y}$ СКО.

Эксперименты второго типа с использованием короткоствольной пневматической пусковой установки с регулируемой мощностью позволяли проводить опытные стрельбы с исследуемыми ЛА в диапазоне дозвуковых скоростей 60...160 м/с. При этом измеряли скорость пули на дистанциях 1 и 9 м оптическими хронографами закрытого типа и определяли коэффициент лобового сопротивления методом «живых сил» [6–8]. Именно коэффициент лобового сопротивления является основным критерием аэродинамического сопротивления ЛА.

В качестве образцов для сравнительного анализа использовали пули типа Match и четыре различных модифицированных типа пуль (рис. 3):

- а) пуля типа Match ;
- б) модифицированная пуля с центральным каналом диаметром 0,15 калибра;
- в) модифицированная пуля с центральным каналом диаметром 0,25 калибра;
- г) модифицированная пуля с четырьмя каналами в головной части диаметром по 0,15 калибра, расположенными симметрично относительно центра и выходящими на боковую поверхность;
- д) модифицированная пуля, сочетающая в себе типы «б» и «г».

Идея модификации пуль с помощью добавления сквозных цилиндрических каналов заключается в том, что в процессе обтекания пули дозвуковым воздушным потоком каналы соединяют лобовую зону повышенного давления с зонами разрежения в донной области пули (типы пуль «б», «в» и «д») или в отрывной области на боковой

поверхности (типы пуль «г» и «д»). Таким образом, перераспределение давления и возможное уменьшение отрывных зон позволит снизить силу лобового сопротивления пули, а дополнительное центрирование пули за счет протока воздуха в каналах — уменьшить рассеивание.

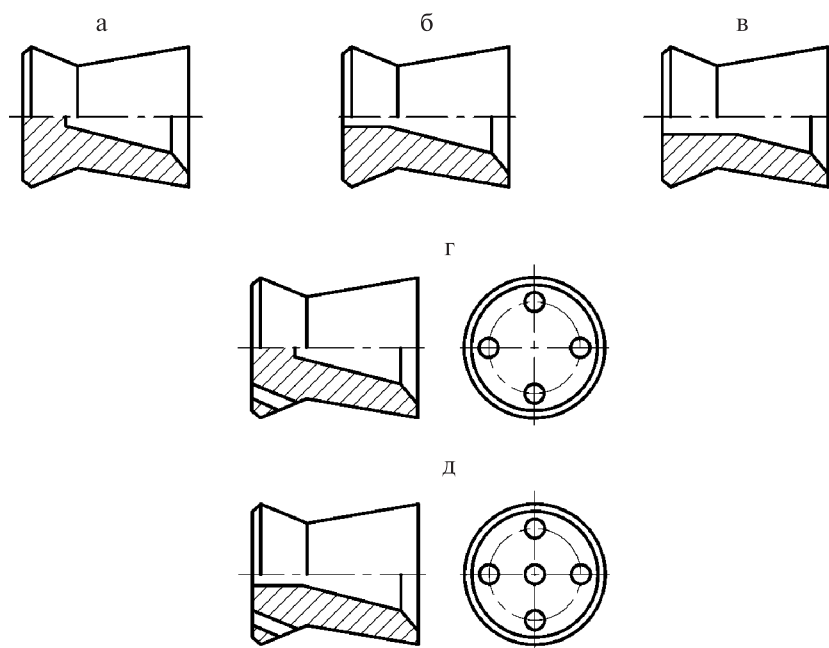


Рис. 3. Типы исследуемых модификаций пуль пневматического оружия

Центральные отверстия соединяют лобовую зону с отрывной зоной возвратного течения в донной части пули, а отверстия в боковой поверхности, соответственно, — лобовую зону повышенного давления с зоной отрыва на боковой поверхности. В пулях с пятью каналами сочетаются два принципа управления обтеканием, описанные выше: проток в донную область и перетекание на боковую поверхность пули. Для этой модификации предполагается сложение двух эффектов: интенсивное уменьшение давления на лобовой части и уменьшение разрежения как на боковой поверхности, так и в донной области течения.

С практической точки зрения [9, 10] предлагаемые модификации имеют некоторые недостатки, такие как повышение требований к технологии изготовления или снижение энергии выстрела ввиду частичного перетекания сжатого газа через сквозные центральные каналы в момент выстрела [11] (типы «б», «в» и «д»). Однако указанные недостатки могут быть минимизированы, если преимущества модификаций будут подтверждены.

Результаты проведенных экспериментов на точность. Полученные по результатам экспериментов первого типа оценки были интерпретированы и представлены графически (рис. 4).

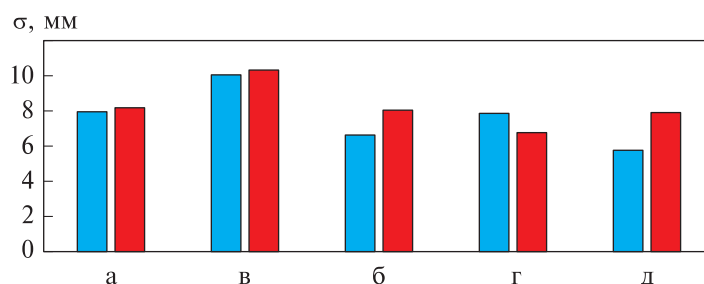


Рис. 4. Среднее квадратичное отклонение пули при разных числах Маха:
M = 0,51 (■); M = 0,72 (■)

Проведен также сравнительный анализ рассеивания видоизмененных пули относительно исходного образца (плоский торец). Относительную разность отклонений модифицированных образцов по отношению к рассеиванию пули с плоским торцом рассчитывали по формуле

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_a - \sigma_i}{\sigma_a} \cdot 100 \% ,$$

где σ_a — СКО для пули типа Match; σ_i — СКО для модифицированной пули.

Результаты этого анализа представлены на рис. 5.

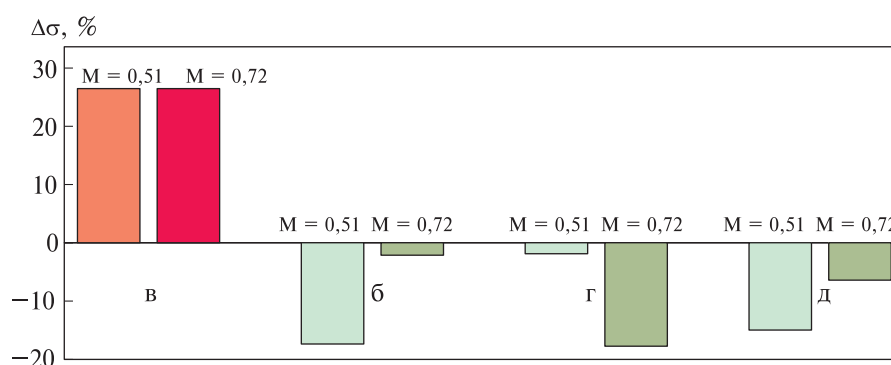


Рис. 5. Оценка относительного рассеивания модифицированных пули

Минимальным СКО при числе Маха, равном 0,51, т. е. наибольшей кучностью, обладают пули типа «б» (с узким центральным каналом), а при M = 0,72 — пули типа «г» (с четырьмя боковыми каналами). Снижение СКО в обоих случаях составляет около 17 %. Высокую точность пули типа «г» при высокой скорости можно объ-

яснить тем, что струи, проходя через каналы, оказывают дополнительный стабилизирующий эффект, повышая кучность.

Результаты экспериментов по определению лобового сопротивления. Обработку экспериментальных данных, как отмечалось выше, проводили по методу живых сил, который в заданных условиях обладает приемлемой точностью при его относительной простоте. Результаты обработки и расчета коэффициента лобового сопротивления C_x также были интерпретированы и представлены графическими зависимостями от числа Маха (рис. 6).

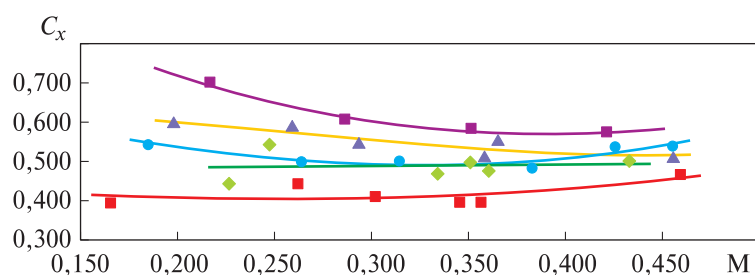


Рис. 6. Зависимости $C_x(M)$ для различных модификаций пуль (— а, — б, — в, — г, — д), полученные экспериментально

На рис. 6 в виде точек указаны результаты эксперимента для соответствующих типов пуль, а график представляет собой результат аппроксимации этих точек. Аппроксимацию производили методом наименьших квадратов с помощью программы MS Excel.

В результате анализа представленного материала можно сделать следующие выводы: наименьшим лобовым сопротивлением обладает пуля типа «в» (с узким центральным каналом), а наибольшим — пуля типа «д» (с пятью каналами). Снижение аэродинамического сопротивления было достигнуто за счет перетекания газа из области пониженного давления в область повышенного. Для более подробного объяснения результатов необходимы дополнительные исследования, позволяющие получить картины течения.

Для вычисления и графического отображения различия между C_x исходной модели пули типа Match и модифицированными пулями использовали формулу

$$\Delta C_x = \frac{C_{xa} - C_{xi}}{C_{xa}} \cdot 100 \%$$

По результатам вычислений построен график $\Delta C_x(M)$ (рис. 7).

Положительное значение ΔC_x свидетельствует об уменьшении лобового сопротивления по отношению к исходному образцу, отрицательное — о возрастании лобового сопротивления относительно

исходного образца. Особое внимания следует обратить на модификации пуль типов «б» и «г».

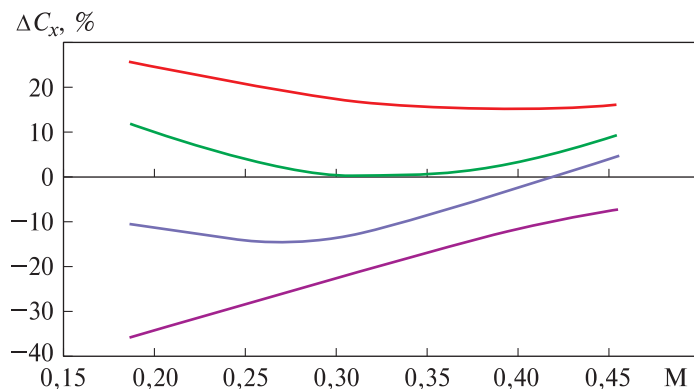


Рис. 7. Зависимости $\Delta C_x(M)$ для рассматриваемых модификаций пуль (— б, — в, — г, — д), полученные по результатам эксперимента

Заклучение. По результатам анализа полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

- все предложенные варианты модификаций пуль позволяют сохранить или даже повысить до 17 % точностные характеристики рассматриваемых типов пуль для пневматического оружия. Исключение в данном случае составляет модификация с широким центральным цилиндрическим каналом, продемонстрировавшая худшее рассеивание по сравнению с пулей типа Match;

- модификации пули с центральными каналами обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением по сравнению с пулей типа Match (на 15...26 %), в то время как модификации с боковыми каналами, наоборот, в основном демонстрируют увеличение коэффициента лобового сопротивления.

Полученные результаты подтверждают состоятельность части предлагаемых модификаций и перспективность дальнейших исследований, связанных с численным моделированием процессов обтекания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Илюхин С.Н., Москаленко В.О., Хлупнов А.И. Экспериментальные исследования влияния формы головной части пули на характеристики рассеивания при дозвуковых скоростях полёта. *Аэрокосмический научный журнал*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 2015, № 05, с. 38–48. DOI: 10.7463/aersp.0515.0819074
- [2] Cardew G.V. *Airgun from Trigger to Target*. Published by G.V. & G.M. Cardew, 1995, 235 p. ISBN-13: 9780950510835
- [3] Трофимов В.Н. *Пули для пневматического оружия*. Москва, Издательский Дом Рученькиных, 2005, 160 с.

- [4] Афанасьев В.А., Афанасьева Н.Ю. Исследование моделей траектории полёта пули. *Системная инженерия*, 2015, № 2, с. 87–94.
- [5] Емельянова Н.С. Программное обеспечение экспериментальных исследований на баллистической трассе. *Молодежный научно-технический вестник*, 2014, № 6. URL: <http://ainsnt.ru/doc/723443.html>
- [6] Илюхин С.Н. Методики нахождения коэффициента лобового сопротивления при проведении экспериментальных исследований на баллистической трассе. *Молодежный научно-технический вестник*, 2014, № 1, с. 3. URL: <http://ainsnt.ru/doc/704437.html>
- [7] Богомолова П.Д. Анализ методик проведения экспериментальных исследований с измерением скорости на баллистической трассе. *Политехнический молодежный журнал*, 2017, № 9. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-9-160
- [8] Богомолова П.Д. Особенности измерений траекторной скорости малогабаритных летательных аппаратов хронографами оптического типа. *Политехнический молодежный журнал*, 2017, № 8. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-8-149
- [9] Frank M., Schönekeß H., Jäger F., et al. Ballistic parameters of 177" (4.5 mm) caliber plastic-sleeved composite projectiles compared to conventional lead pellets. *Int J Legal Medicine.*, 2013, no. 127, pp. 1125–1130. DOI: 10.1007/s00414-013-0904-x
- [10] Denny M. The Internal Ballistics of an Air Gun. *The Physics Teacher*, 2011, no. 49, p. 8. DOI: 10.1119/1.3543577
- [11] Harshey A., Srivastava A., Yadav V.K., et al. Analysis of glass fracture pattern made by 177" (4.5 mm) caliber air rifle. *Egypt J Forensic Sciences*, 2017, no. 20, p. 7. DOI: 10.1186/s41935-017-0019-5

Статья поступила в редакцию 30.09.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Илюхин С.Н., Москаленко В.О., Булавина В.В. Исследование рассеивания и аэродинамического сопротивления модифицированных пуль при дозвуковых скоростях полета на баллистической трассе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-12-2039>

Илюхин Степан Николаевич — старший преподаватель кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных и научно-популярных работ в области баллистики, динамики полета, управления движением летательных аппаратов и истории оружия. e-mail: iljuchin.stepan@bmstu.ru

Москаленко Валерий Осипович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 170 научных работ в области аэрогазодинамики и управления движением летательных аппаратов, совершенствования учебного процесса и качества подготовки специалистов с высшим техническим образованием. e-mail: moskalenko@bmstu.ru

Булавина Василина Васильевна — окончила кафедру «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2020 г. e-mail: bvv8v@yandex.ru

Investigation of dispersion and aerodynamic drag of modified bullets at subsonic flight speeds on a ballistic track

© S.N. Ilyukhin, V.O. Moskalenko, V.V. Bulavina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The purpose of the work was to experimentally research and analyze the effect of the proposed modifications of a pneumatic bullet on the accuracy parameters of the shooting system with a subsonic initial speed. The study introduces variants of modernization of a bullet with a flat head part for pneumatic weapons, describes the external ballistic experiments carried out on the ballistic track of the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft of Bauman Moscow State Technical University, and theoretically substantiates the physics of the interaction between a bullet and the air, which became possible after analyzing the results of shooting. The obtained correlation between scattering characteristics of unguided aircraft and the type of modification of their aerodynamic shape is described. On the basis of the data obtained, modifications of the bullet shape were determined, leading not only to a decrease in aerodynamic drag, but also to a certain decrease in dispersion during shooting.

Keywords: ballistic track, airgun, bullet, dispersion, aerodynamic drag

REFERENCES

- [1] Ilyukhin S.N., Moskalenko V.O., Khlupnov A.I. *Aerokosmicheskiy nauchnyy zhurnal* — *Aerospace scientific journal*, 2015, no. 5, pp. 38–48.
- [2] Cardew G.V. *Airgun from Trigger to Target*. Published by G.V. & G.M. Cardew, 1995, 235 p. ISBN-13: 978-0950510835
- [3] Trofimov V.N. *Puli dlya pnevmaticheskogo oruzhiya* [Bullets for pneumatic weapons]. Moscow, Izd. Dom Ruchenkinykh Publ., 2005, 160 p.
- [4] Afanasev V.A., Afanaseva N.Yu. *Sistemnaya inzheneriya* — *System engineering*, 2015, no. 2, pp. 87–94.
- [5] Emelyanova N.S. *Molodezhnyy nauchno-tehnicheskiy vestnik (Youth Scientific and Technical Bulletin)*, 2014, no. 6. Available at: <http://ainsnt.ru/doc/723443.html>
- [6] Ilyukhin S.N. *Molodezhnyy nauchno-tehnicheskiy vestnik (Youth Scientific and Technical Bulletin)*, 2014, no. 1, pp. 3. Available at: <http://ainsnt.ru/doc/704437.html>
- [7] Bogomolova P.D. *Politehnicheskiy molodezhny zhurnal* — *Politechnical student journal*, 2017, no. 9. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-9-160
- [8] Bogomolova P.D. *Politehnicheskiy molodezhny zhurnal* — *Politechnical student journal*, 2017, no. 8. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-8-149
- [9] Frank M., Schönekeß H., Jäger F., et al. Ballistic parameters of 177" (4.5 mm) caliber plastic-sleeved composite projectiles compared to conventional lead pellets. *Int J Legal Medicine*, 2013, no. 127, pp. 1125–1130. DOI: 10.1007/s00414-013-0904-x
- [10] Denny M. The Internal Ballistics of an Air Gun. *The Physics Teacher*, 2011, no. 49, p. 8. DOI: 10.1119/1.3543577
- [11] Harshey A., Srivastava A., Yadav V.K., et al. Analysis of glass fracture pattern made by 177" (4.5 mm) caliber air rifle. *Egypt J Forensic Sciences*, 2017, no. 20, p. 7. DOI: 10.1186/s41935-017-0019-5

Ilyukhin S.N. (b. 1990) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2013, Assist. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 scientific and popular scientific papers in the field of ballistics, flight dynamics, aircraft motion control and weapons history. e-mail: iljuchin.stepan@bmstu.ru

Moskalenko V.O. (b. 1945) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1969, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 170 papers in the field of aerogasdynamics and control of the movement of aircraft, improving the educational process and the quality of training specialists with higher technical education. e-mail: moskalenko@bmstu.ru

Bulavina V.V. (b.1996) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2020, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: bvv8v@yandex.ru