

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.2–5

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ЗАТВОР ДЛЯ
СВЕРХЪЯРКИХ ПУЧКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ИСТОЧНИКОВ ПОКОЛЕНИЯ 4+**

© 2026 г. П. С. Завьялов^{a, b}, Д. В. Скоков^b, М. С. Кравченко^b, Д. В. Карпов^{a, b},
О. М. Кутькин^a, М. А. Завьялова^{a, b}, Е. Н. Денежкин^a

^aНовосибирский государственный технический университет

Россия, 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

^bКонструкторско-технологический институт научного приборостроения

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630058, Новосибирск, ул. Русская, 41

*e-mail: m.zavyalova@corp.nstu.ru

Поступила в редакцию 05.08.2025 г.

После доработки 30.01.2026 г.

Принята к публикации 03.02.2026 г.

Разработан быстродействующий экспозиционный затвор монохроматического пучка сверхъярких пучков синхротронного излучения источников поколения 4+. Затвор позволяет подавлять монохроматический пучок синхротронного излучения апертурой до $3 \times 3 \text{ мм}^2$ на 5 порядков по интенсивности и иметь время срабатывания на открытие/закрытие не более 10 мс. В ходе испытаний затвора установлены оптимальные параметры режимов работы рычагов затвора. Высокоскоростная съемка и анализ видеоизображений дали возможность продемонстрировать гашение колебаний рычагов за счет последующих шагов актуаторов, когда импульсы открытия/закрытия находятся в противофазе с собственными колебаниями рычагов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) представляет собой мощный универсальный инструмент для комплексного исследования материалов благодаря его уникальным свойствам, которые делают его незаменимым в различных областях науки и техники [1]. Методы исследования различных материалов с использованием СИ подразумевают возможность точного управления пучком – его спектральными и энергетическими характеристиками. Превышение пороговой мощности пучка СИ может вызывать структурные изменения в материалах, разрушение и неверную интерпретацию их свойств. При создании источников СИ, в том числе Сибирского

кольцевого источника фотонов [2], актуальными задачами являются проектирование и разработка устройств, позволяющих мгновенно перекрывать и дозировать энергию пучка на образце. При этом требования к таким устройствам подразумевают работу в условиях вакуума и значительных радиационных и тепловых нагрузок. Экспозиционный затвор для сверхъярких пучков синхротронного излучения из источников поколения 4+ играет важнейшую роль в проведении экспериментов на станциях источников СИ, поскольку именно он позволяет предотвращать перегрев исследуемых образцов и, как следствие, их разрушение. Затворы монохроматического пучка позволяют управлять параметрами СИ, такими как энергия и временная структура.

Как правило, в лазерных источниках излучения для быстрого перекрытия пучка используются несколько различных типов затворов: электромеханические, электромагнитные и электрооптические [3–5]. В работе [6] проанализированы затворы всех этих трех видов и дано обширное практическое руководство для разработчиков лазерных систем. Сделан вывод о том, что электрооптический затвор обеспечивает максимально точную и надежную работу, время открытия составляет всего 0.6 мс, также этот затвор обеспечивает высокую точность выполнения команд сигнала, даже при очень быстром переключении ($T = 10$ мс). Некоторые примеры последних достижений демонстрируют впечатляющие результаты с использованием пьезоэлектрических актуаторов [7].

Целью настоящей работы является разработка быстродействующего экспозиционного затвора сверхъярких пучков синхротронного излучения для источников поколения 4+, который позволяет подавлять монохроматический пучок СИ не менее чем на 5 порядков по интенсивности и иметь время срабатывания на открытие/закрытие не более 10 мс.

2. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ЗАТВОР НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОАКТУАТОРА

Быстродействующий экспозиционный затвор пучка (далее – затвор) предназначен для быстрого перекрывания пучка синхротронного излучения (время открытия/закрытия – не более 10 мс). Скорость срабатывания затвора определяет время, в течение которого синхротронное излучение будет воздействовать на исследуемый образец и детектор. При закрытии устройство должно уменьшить интенсивность излучения на пять порядков, т. е. оставить 0.001% от исходной плотности мощности. При этом работать затвор пучка должен в условиях глубокого вакуума, т. е. желательно, чтобы в нем не было никаких трущихся частей, подшипников, смазки и т.п. Кроме того, затвор должен быть очень надежным и отрабатывать миллионы циклов. Практически единственным решением в таких условиях является

использование пьезоактуаторов [7], которые обладают достаточным быстродействием и надежностью, не имея при этом трения.

На рис. 1 представлен общий вид затвора пучка СИ, разработанного для станции 1–2 “Структурная диагностика”. Он состоит из рычагов, которые перекрывают пучок СИ апертурой до $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Рычаги расположены на основании и смещаются с помощью усиленных пьезоактуаторов Xaxis400A5 (Harbin Core Tomorrow Science & Technology Co, КНР). Усиленный пьезоактуатор увеличивает смещение, создаваемое низковольтными пьезоэлектрическими элементами, за счет специальной усиливающей механической конструкции. Усиленная конструкция представляет собой механическую оболочку, изготовленную из стали. Помимо обеспечения оптимизированного усилия предварительной затяжки пьезоэлектрических элементов, она также защищает их от растягивающих усилий, которые могут привести к их разрушению. Пьезоактуатор закреплен в корпусе, состоящем из компонентов вакуумного оборудования: тройника, переходника и вакуумного разъема. Все вакуумные соединения соответствуют стандарту CF. Согласно техническому заданию, блок управления пьезоактуаторами интегрирован с автоматизированной системой управления дифрактометров.

Рис. 1. Общий вид затвора пучка синхротронного излучения.

Принцип работы затвора основан на упругой деформации двух независимых рычагов, которые более детально представлены на рис. 2. Также на рис. 2 показаны схема размещения рычагов на основании, зоны размещения пьезоактуаторов и векторы их сил. Для выбора материала рычагов был проведен параметрический анализ конструкции затвора в программном продукте компании Autodesk Inventor Professional [8], в котором можно моделировать и анализировать критические напряжения и деформации в деталях и сборках при различных нагрузках и условиях. Это дает возможность оптимизировать конструкцию и предотвратить поломки затвора на этапе проектирования.

Рис. 2. Размещение рычагов на основании

При проведении параметрического анализа выбор материала является важным этапом. Степень влияния каждой характеристики на упругую деформацию рычагов определяется в процессе параметрического анализа. Материал задается для определения его физических и механических свойств, которые влияют на поведение моделируемой системы. Эти свойства используются в расчетах для определения напряжений, деформаций, перемещений и других параметров, необходимых для оценки эффективности затвора. В результате моделирования в качестве материала для рычагов была выбрана бериллиевая бронза БрБ2, а векторы силы равны 16 Н. Результаты анализа показаны на рис. 3.

Рис. 3. Параметрический анализ конструкции затвора в программном продукте компании Autodesk Inventor Professional: **а** – максимальные напряжения в рычагах; **б** – смещение рычагов

Результаты расчета показали, что при усилии 16 Н деформации рычагов составили 2 мм, а максимальное напряжение в рычагах равнялось 282 МПа. Для бериллиевой бронзы БрБ2 допустимые напряжения имеют значения от 590 до 930 МПа.

3. РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ НОЖЕЙ ЗАТВОРА

Для оценки поглощения СИ в материале затвора по закону Бугера–Ламберта–Бера была рассчитана зависимость отношения интенсивности прошедшего излучения к интенсивности падающего излучения от толщины пластинки из различных материалов (сплав ВД-10, Мо, Та и Сu) при энергиях 10–30 кэВ. Линейный коэффициент поглощения был взят из таблиц Henke [9]. Результаты представлены на рис. 4 и в табл. 1. При расчетах плотность сплава ВД-10 (W, Сu) считалась равной 8 г/см³.

Таблица 1. Рекомендованные значения толщины ножей для различных материалов для $I/I_0 \leq 10^{-5}$ с коэффициентом запаса 4

Материал	Толщина, мм
ВД-10	3.2
Мо	1.6
Та	1.2
Сu	4.8

Рис. 4. Зависимость отношения интенсивности прошедшего излучения к интенсивности падающего излучения I/I_0 от толщины пластинки d ...

Исходя из полученных зависимостей, можно выбрать материал и толщину поглотителей (наконечников рычагов). На данном этапе ввиду простоты обработки использовалась медь.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЭКСПОЗИЦИОННОГО ЗАТВОРА

На основе моделирования и расчетов параметров затвора был изготовлен его прототип в вакуумном исполнении, представленный на рис. 5.

Рис. 5. Внешний вид быстродействующего экспозиционного затвора

Пьезоактуаторы, управляющие положениями рычагов, работают в диапазоне напряжений от –20 В до +150 В. При значении напряжения –20 В рычаги максимально сомкнуты, при значении напряжения +150 В рычаги максимально разомкнуты. Максимально возможное раскрытие рычагов, измеренное концевыми мерами, составило 3.5 мм.

Для настройки затвора рассматривались 10 режимов работы для быстрого открытия и закрытия рычагов. Абсолютная величина хода пьезоактуаторов составляет 170 В (от –20 В до +150 В). Режимы работы выбирались таким образом, чтобы обеспечить максимальное быстродействие при полной апертуре 3.5 мм.

Работа затвора снималась с использованием скоростной камеры NOVA fastcam S-series с разрешением 3072×512 пикселей и скоростью съемки 4000 кадров в секунду (0.25 мс на кадр). Время нарастания напряжения на актуаторах можно установить достаточно малым (до 2 мс). Но из-за ударного воздействия актуаторов на рычаги возникали их колебания в крайних положениях. Время колебаний после смыкания/раскрытия определялось по изображениям с камеры. Режимы работы открытия рычагов представлены в табл. 2. Затвору требуется примерно 50 мс для того, чтобы прийти в состояние покоя после достижения заданного положения, в течение которого он продолжает колебаться в конце своего пути. Следовательно, когда новый управляющий сигнал поступает до завершения этого периода колебаний, рычаг затвора начинает действовать совершенно неуправляемо, быстро колеблясь между крайними точками своего пути.

Таблица 2. Режимы открытия рычагов затвора при начальном напряжении –20В

Режим работы	Шаг, В	Количество шагов	Задержка между шагами, мс	Время открытия, мс	Время колебаний, мс
1	17	10	1	25.50	16.25
2	34	5	1	14.50	52.50
3	42	4	1	9.50	75.00
4	56	3	1	6.25	107.00
5	85	2	1	5.25	160.00
6	17	10	2	36.25	46.50
7	34	5	2	14.50	20.75
8	42	4	2	14.50	71.25
9	56	3	2	6.50	78.00
10	85	2	2	5.75	162.25

Данные из табл. 2 представлены на рис. 6.

Рис. 6. Время открытия шторок – синяя линия; время колебания рычагов – красная линия; время открытия шторок 10 мс (согласно ТЗ) ...

Режимы открытия рычагов затвора представлены в табл. 3

Таблица 3. Режимы открытия рычагов затвора при начальном напряжении 150 В

Режим работы	Шаг, В	Количество шагов	Задержка между шагами, мс	Время закрытия, мс	Время колебаний, мс
1	-17	10	1	22.00	67.00
2	-34	5	1	13.25	104.50
3	-42	4	1	15.75	103.75
4	-56	3	1	8.25	131.50
5	-85	2	1	6.25	155.50
6	-17	10	2	44.75	52.75
7	-34	5	2	21.25	99.50
8	-42	4	2	15.25	90.50
9	-56	3	2	13.75	132.50
10	-85	2	2	10.00	114.00

Данные табл. 3 представлены на рис. 7.

Рис. 7. Время закрытия шторок – синяя линия; время колебания шторок – красная линия; время закрытия шторок 10 мс...

В ходе рассмотрения разных режимов работы рычагов затвора удалось найти оптимальные параметры: режим №4 (3 шага по 56 В, 1 мс между шагами) и режим №9 (3 шага по 56 В, 2 мс между шагами). При анализе видеоизображений было видно, что в этих режимах происходило гашение колебаний рычагов за счет последующих шагов актуаторов, т. е. импульсы открытия/закрытия находились в противофазе с собственными колебаниями рычагов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей статье представлен быстродействующий экспозиционный затвор монохроматического пучка для научных станций синхротронного излучения. Особое внимание в ходе испытаний затвора было уделено выявлению режимов работы, когда у рычагов были сведены к минимуму колебания за счет подбора количества шагов и времени между шагами усиленного пьезоактуатора. С помощью высокоскоростной видеосъемки были установлены способы минимизации времени колебаний затвора после открытия/закрытия.

Затворы монохроматического пучка являются неотъемлемой частью научных станций синхротронного излучения. Их развитие и совершенствование открывают новые возможности для исследований в различных областях науки. Будущие достижения в этой области будут способствовать более глубокому пониманию физических процессов и материалов, что, в свою очередь, будет иметь важное значение для технологий и индустрии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»: первому проректору В.В. Янпольскому, руководителю Инжинирингового центра «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» А.И. Смирнову и старшему научному сотруднику данного центра В.Ю. Скибе за помощь в организации работ, а также сотрудникам Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» за ценные советы и обсуждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в ФГОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (программа «Приоритет-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Willmott P.* An Introduction to synchrotron radiation: techniques and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019. <https://doi.org/10.1002/9781119970958.index>
2. *Бухтияров А.В., Бухтияров В.И., Журавлев А.Н. и др.* // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 5. С. 742. <https://doi.org/10.31857/S0023476122050022>.
3. *Adams C.S.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. Т. 71. № 1. С. 59. <https://doi.org/10.1063/1.1150160>
4. *Лычагин С.И.* Авторское свидетельство № 1775712 А1 СССР, МПК G03В 27/80, ЦНИИМаш, 1992.
5. *Пономарев И.В., Тончий С.Б., Евтушенко Г.С.* // Медицинская техника. 2024. № 3. С. 8. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75157795>
6. *Aboud D., Wood M., Zeppetelli G., Joy N., Kietzig A.-M.* // Materials. 2022. V. 15. № 3. С. 897. <https://doi.org/10.3390/ma15030897>
7. *Bowden W., Hill I.R., Baird P.E.G., Gill P.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 1. <https://doi.org/10.1063/1.4973774>
8. *Большаков В.П., Бочков А.Л., Лячек Ю.Т.* Твердотельное моделирование деталей в САД системах: AutoCAD, Компас-3В, SolidWorks, Inventor, Creo. Учебный курс. С.-Петербург, 2015, 250 с.
9. *Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.* // At. Data Nucl. Data Tables. 1993. V. 54. № 2. С. 181. <https://doi.org/10.1006/adnd.1993.1013>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Общий вид затвора пучка синхротронного излучения.
- Рис. 2.** Размещение рычагов на основании.
- Рис. 3.** Параметрический анализ конструкции затвора в программном продукте компании Autodesk Inventor Professional: **а** – максимальные напряжения в рычагах; **б** – смещение рычагов.
- Рис. 4.** Зависимость отношения интенсивности прошедшего излучения к интенсивности падающего излучения I/I_0 от толщины пластинки d при различных значениях энергии излучения для следующих материалов: **а** – ВД, **б** – Мо, **в** – Та, **г** – Си.
- Рис. 5.** Внешний вид быстродействующего экспозиционного затвора.
- Рис. 6.** Время открытия шторок – синяя линия, время колебания рычагов – красная линия, время открытия шторок 10 мс (согласно ТЗ) – зеленый пунктир.
- Рис. 7.** Время закрытия шторок – синяя линия, время колебания шторок – красная линия, время закрытия шторок 10 мс – зеленый пунктир.

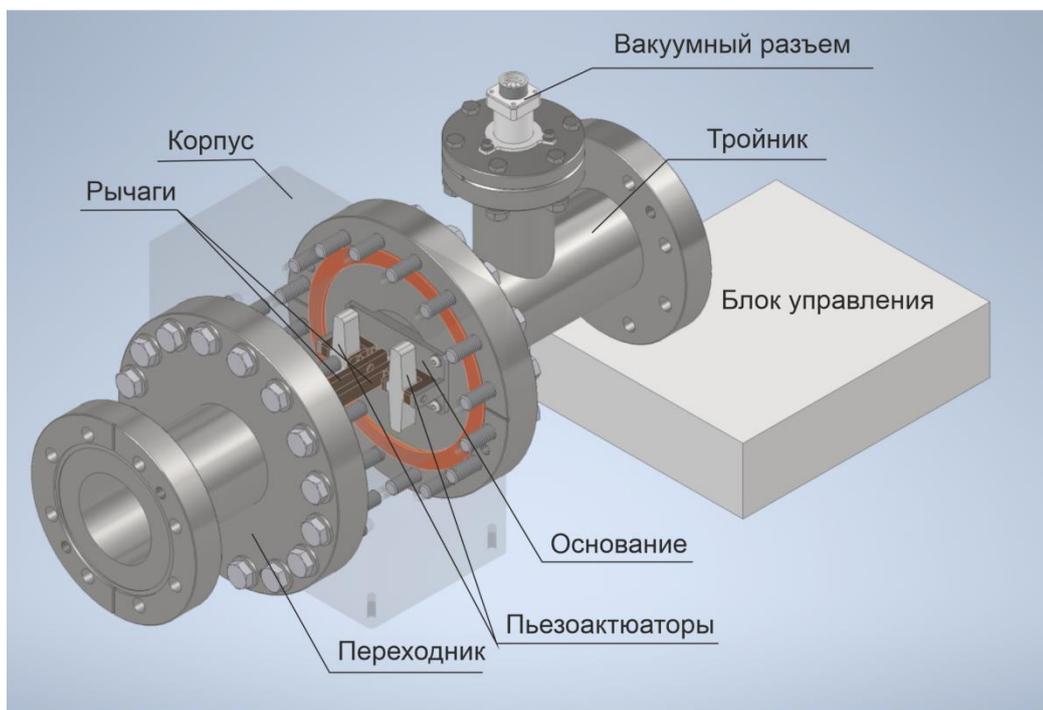


Рис. 1.

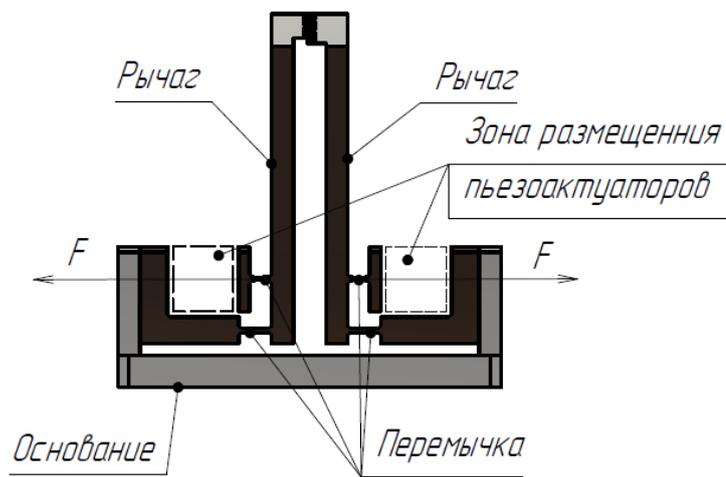
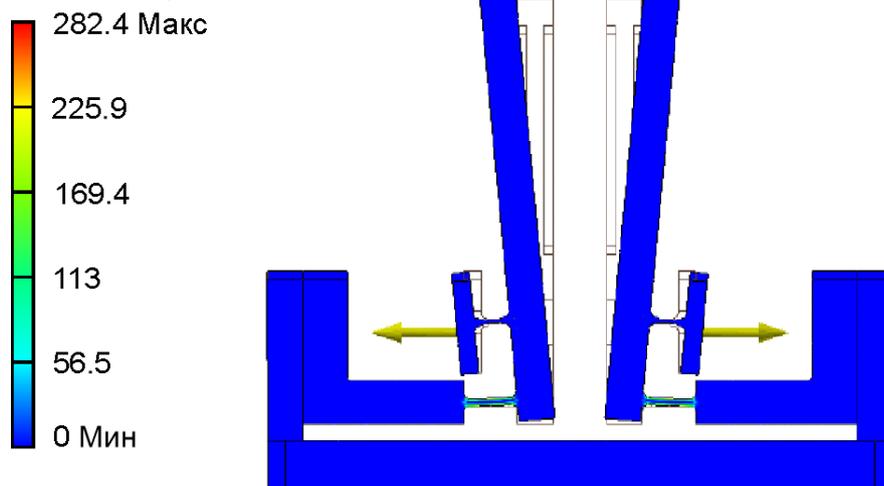


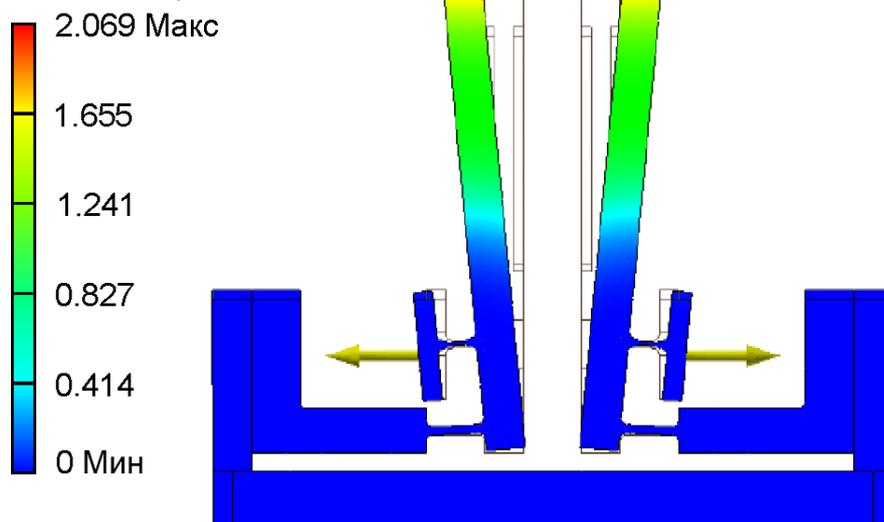
Рис. 2.

Тип: Напряжение по Мизесу
Единица: МПа
18.06.2025, 13:41:00



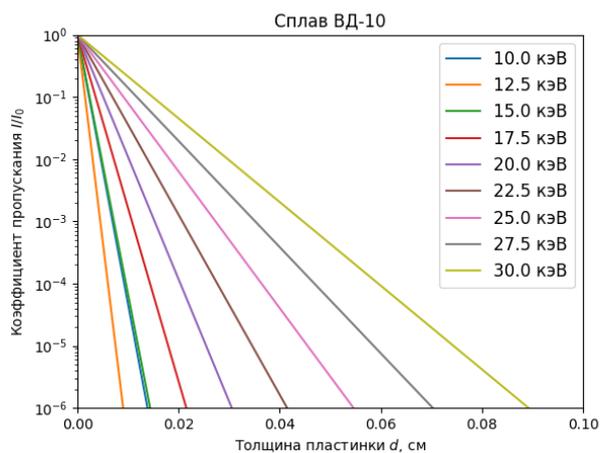
(a)

Тип: Смещение
Единица: мм
18.06.2025, 13:38:57

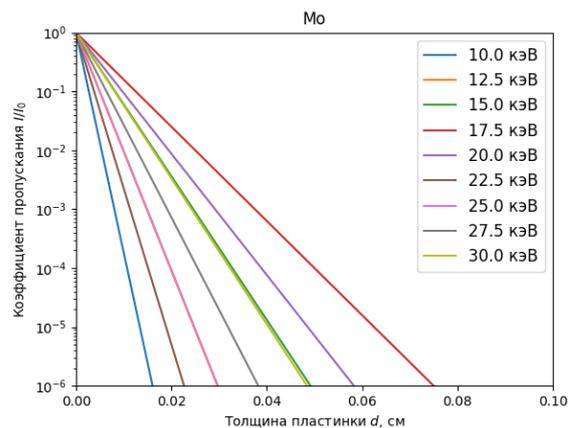


(б)

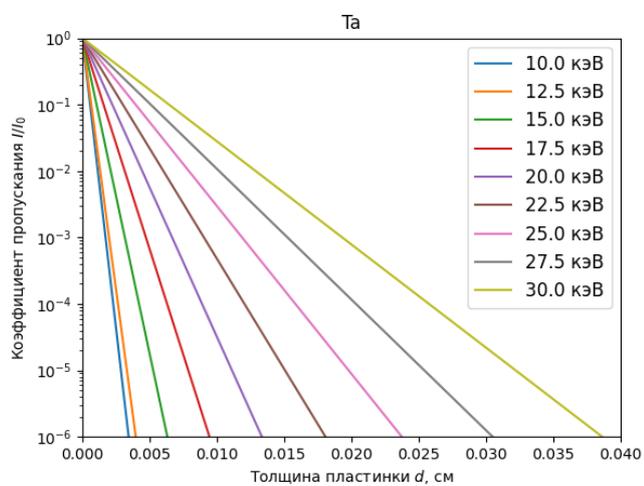
Рис. 3.



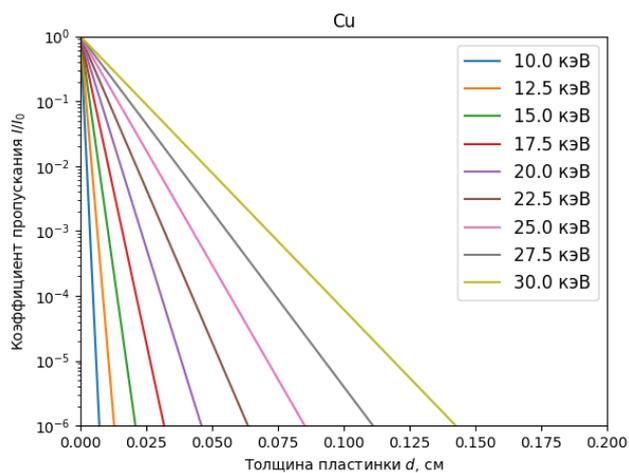
(a)



(б)



(B)



(Г)

Рис. 4.

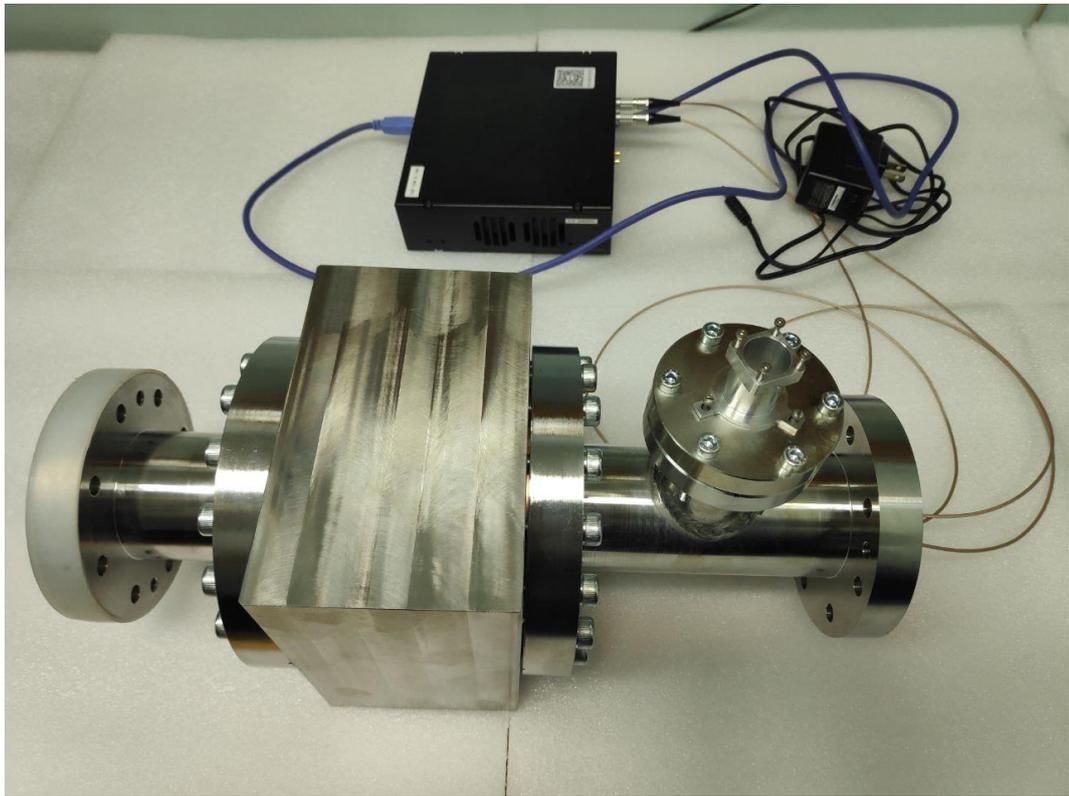


Рис. 5.

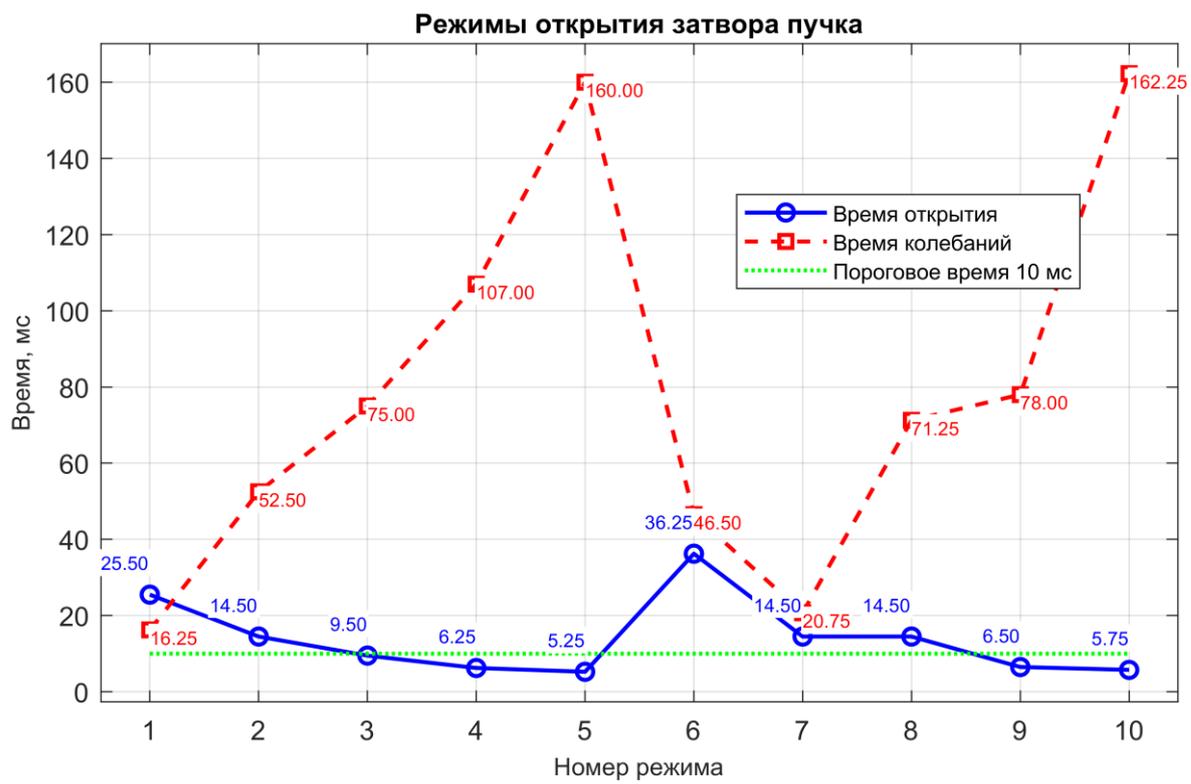


Рис. 6.

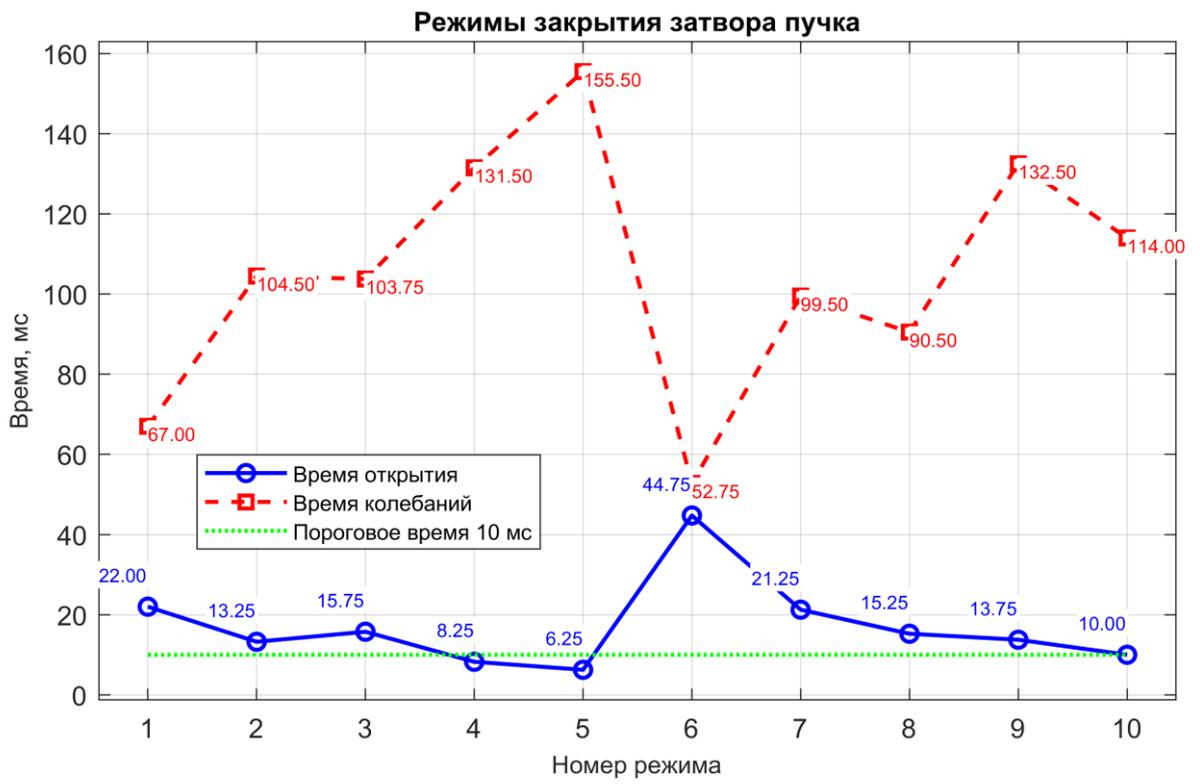


Рис. 7.