

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 616-073.75

**ПРОТОТИП ОТСЕИВАЮЩЕЙ РЕШЁТКИ,
ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО
СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ЧИСТОГО
ВОЛЬФРАМА**

И. С. Дьячков¹, А. В. Кулик², В. Ф. Образцов³, Д. М. Стрекалина⁴,
С. А. Холоденко¹, С. В. Чернышихин¹, Е. В. Шманин¹

В данной статье описан процесс производства прототипа вольфрамового коллиматора с проективной геометрией с помощью технологии лазерного спекания порошкового материала. Проведённые эксперименты продемонстрировали эффективность прототипа рентгеновского раstra для подавления фона от рассеянных фотонов при рентгеновской съёмке. Особенностью произведённого образца в применении к медицине является уменьшенное поглощение первичных рентгеновских лучей, что приводит к меньшему времени экспозиции и меньшему облучению пациента. Результаты показывают, что такая решётка обеспечивает однозначное улучшение в обнаружении маркеров, особенно с дополнительно установленными препятствиями, имитирующими неблагоприятные условия для съёмки.

Ключевые слова: рассеянное излучение, отсеивающий растр, аддитивное производство, чистый вольфрам, качество изображения.

Введение. Отсеивающие решётки или растры широко применяются в медицине для снятия рентгеновских снимков [1]. Впервые эту идею предложил в 1913 году Густав

¹ НИТУ “МИСиС”, 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4; e-mail: diachkov.is@misis.ru.

² ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а.

³ НИЦ “Курчатовский институт” ИФВЭ, 142281 Россия, Московская обл., г. Протвино, пл. Науки, 1.

⁴ Московский политехнический университет, 107023 Россия, Москва, Большая Семёновская, 38.

Питер Баки, показав, что поглощающая решётка, помещённая между пациентом и детектором, уменьшит количество рассеянных рентгеновских лучей, улучшая качество изображения [2]. В качестве поглощающего материала в основном используется свинец, однако у него есть некоторые недостатки, связанные с мягкостью и особенностями производства [3]. Альтернативным материалом является вольфрам, чей выбор становится более предпочтительным с развитием технологии лазерного спекания порошкового материала (Laser Powder Bed Fusion, LPBF). Выбор вольфрама в качестве материала для отсеивающей решётки обусловлен его выдающимися поглощающими свойствами [4]. Имея высокий заряд ядра (74), вольфрам эффективно взаимодействует с рентгеновскими лучами, поглощая рассеянное излучение. Механическая прочность и износостойкость вольфрама также превосходят соответствующие параметры свинца. Благодаря этому растры долго сохраняют свою эффективность, обеспечивая постоянное качество изображения в пределах срока эксплуатации.

В качестве растровых решеток могут использоваться коллиматоры с параллельными стенками или проективной геометрией. Последние имеют стенки, ориентированные на точечный источник рентгеновского излучения (рис. 1). Этот вариант имеет преимущество из-за уменьшенного поглощения первичных рентгеновских лучей вследствие меньшей площади сечения поглощающего материала. С другой стороны, использование проективной геометрии требует точного размещения и выравнивания решётки относительно источника рентгеновских лучей. Такая решётка не может перемещаться во время сбора данных для равномерного распределения своей тени по снимку, однако этого можно добиться её вращением. Производство таких коллиматоров представляет собой нетривиальную задачу. Образцы, доступные на рынке, зачастую имеют толстые стенки, поглощающие значительную часть первичных лучей.

В данной статье описывается прототип коллиматора из чистого вольфрама, изготовленный с помощью технологии LPBF, разработанной в НИТУ МИСИС для производства детекторов в области физики высоких энергий. Эта технология позволяет производить коллиматоры с проективной геометрией. Прочность вольфрама и высокие поглощающие свойства также позволяют сделать стенки коллиматора тонкими. Сочетание этих факторов приводит к снижению поглощению первичных рентгеновских лучей. В результате время, необходимое для сбора достаточного количества данных, а значит и облучение пациента, снижаются [6]. Целью работы было испытать технологию LPBF в применении к производству отсеивающих решёток, изготовить прототип с проективной геометрией и минимально возможной толщиной стенок, при которой со-

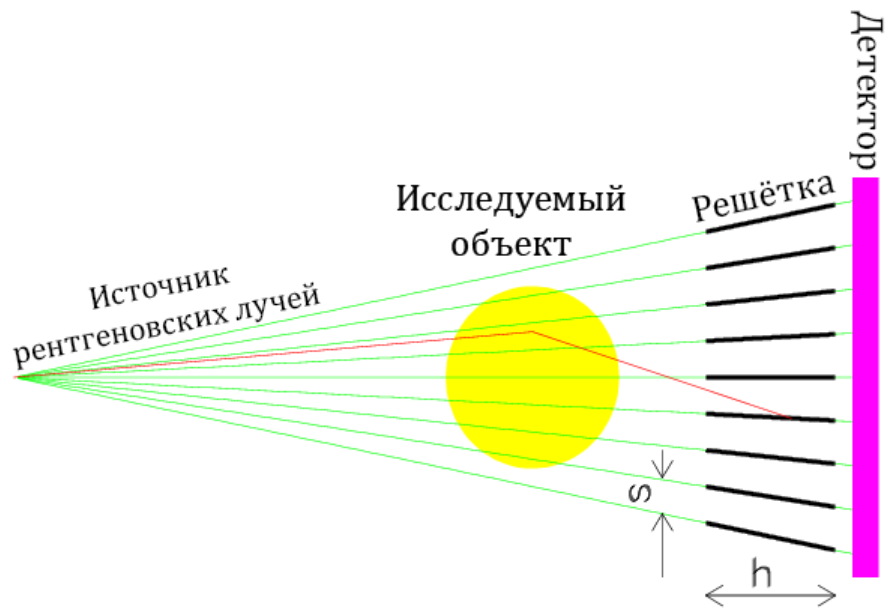


Рис. 1: Схема экспериментальной установки и вид отсеивающей решётки.

храняется механическая прочность, а также проверить эффективность для подавления рассеянных рентгеновских лучей.

Производство. В качестве материала для изготовления отсеивающей решётки был использован порошок вольфрама W1, произведённый EOS GmbH (Германия). Исследование гранулометрического состава порошка было выполнено на лазерном измерителе частиц ANALYSETTE 22 Nanotec (Fritsch, Германия). Морфология частиц порошка была анализирована с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Vega 3 (Tescan, Чехия). Изображение СЭМ порошка вольфрама показано на рис. 2(б). Частицы, в основном, имеют вид многогранников с незначительным количеством спутников. Размер частиц имеет нормальное распределение, показанное на рис. 2(а). Эквивалентные проценти диаметров составили $d_{10} = 4.6$ мкм, $d_{50} = 9.7$ мкм и $d_{90} = 25.6$ мкм. Скорость потока 600 грамм за 108 секунд была получена в воронке Холла с диаметром отверстия 4 мм. Таким образом, несмотря на то, что порошок имеет несферическую форму и сравнительно небольшой средний размер частиц, он удовлетворяет требованиям технологии LPBF для оптимальной скорости потока, чтобы создать плотный и однородный слой.

Процесс LPBF был осуществлён на аппарате Addsol D50 (Additive Solutions, Россия). Установка была создана для экспериментальных нужд и имеет относительно небольшой цилиндрический объём высотой 150 мм с круглым основанием диаметром 50 мм. Базо-

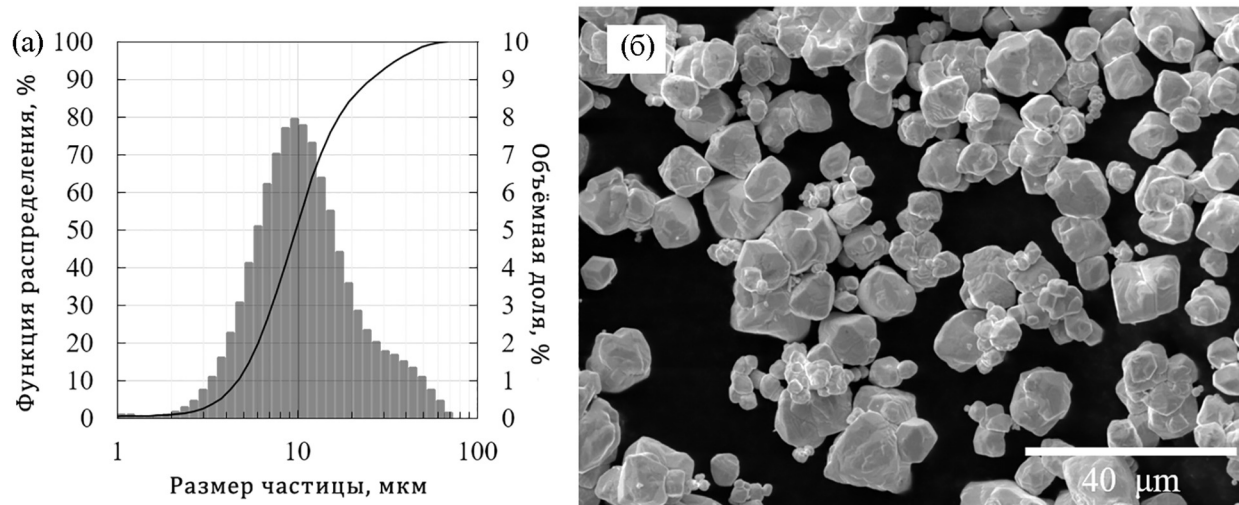


Рис. 2: Характеристики порошка вольфрама, использованного для LPBF: распределение размера частиц (а) и изображение СЭМ (б).

вая пластина из стали была использована в качестве субстрата для первых слоёв вольфрамовой решётки. Установка оборудована волоконным лазером мощностью 400 Вт (IPG Photonics, Россия). Лазер имеет гауссово распределение энергии, лазерное пятно размером 80 мкм работает при длине волны 1070 нм. Процесс проводился в аргоновой среде с содержанием кислорода ниже 100 миллионных долей. Исполняемые файлы были подготовлены с помощью программного обеспечения Glicer (ATSS, Россия). Тонкостенная решётка была создана методом послойного нанесения для обеспечения максимально возможного разрешения. Основной процесс имел следующие характеристики: мощность лазера 350 Вт, скорость сканирования 1200 мм/с, толщина слоя 20 мкм. Скорость сканирования сильно влияет на размер ванны расплава, поэтому в ходе предварительных экспериментов она увеличивалась до максимального значения (1200 мм/с), при которой цельность (непрерывность) стенок сохранялась. В предыдущей работе было показано, что толщина слоя 20 мкм приводит к лучшим механическим свойствам [7]. После процесса LPBF образцы отделялись от субстрата с помощью электроэрозионного станка GX-320L (CHMER EDM, Китай).

Высота и шаг периодической структуры составили 50 мм и ~ 5 мм, соответственно, толщина стенок ~ 100 мкм. Прототип решётки, представленный в этом исследовании, состоит из 6×6 ячеек. Внешние размеры прототипа ограничены небольшими размерами установки LPBF в лаборатории.

Экспериментальная установка. Проверка эффективности изготовленной вольфрамовой решётки была проведена на установке, схематично изображённой на рис. 1. Она состоит из источника рентгеновского излучения, макета тазовой области человека толщиной 40 см, дополненного набором гранул различной плотности, прототипа коллиматора и детекторной плоскости (рис. 3). Источник рентгеновских лучей расположен на расстоянии 2 м от детекторной плоскости. Сходящаяся отсеивающая решётка находится за исследуемым объектом перед детектором.

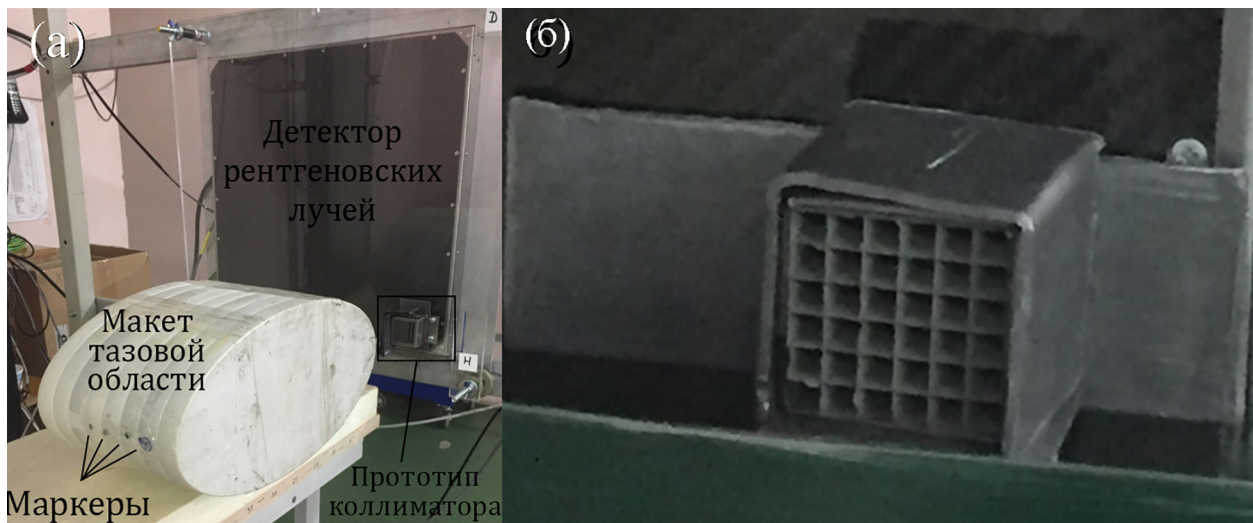


Рис. 3: Экспериментальная установка, состоящая из макета тазовой области с дополнительными маркерами разной плотности и детектора (а) и прототип вольфрамового коллиматора с проективной геометрией (б).

Маленький размер прототипа требует точной калибровки. На рис. 4(а) представлено изображение решётки в виде двумерной гистограммы амплитуды сигнала по осям X и Y. По осям отложены ID пикселей. На рис. 4(б) показана одномерная проекция зависимости от координаты X. Периодическая структура с уменьшенным сигналом соответствует теням коллиматора. Сигнал не падает до нуля, что означает, что пиксели (~ 420 мкм) лишь частично заслонены стенками. Зачастую тень распространяется на 2 пикселя. Это неизбежно, если период решётки не приведён в точное соответствие с положением пикселей детектора. Для правильного позиционирования решётки в качестве критерия корректировки используется интеграл сигнала, то есть сумма зарегистрированных событий во всех пикселях выбранной тени. Это значение нормировалось на интеграл сигнала вне тени (40 000).

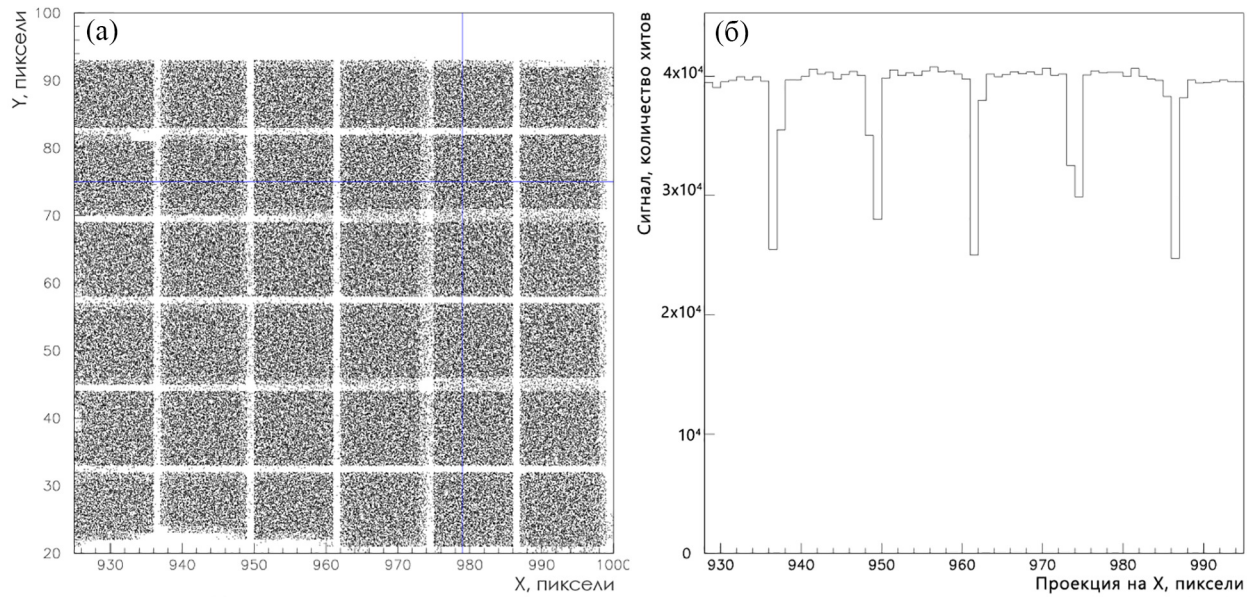


Рис. 4: Изображение отсеивающей решётки, полученное с помощью рентгеновских лучей (а), и его проекция на ось X (б).

В процессе поворота прототипа отслеживаются 5 таких интегралов. На рис. 5 показаны значения всех пяти интегралов как функции угла наклона по горизонтали (а) и по вертикали (б). Минимальное значение определяет необходимую позицию. Оно составляет меньше половины пикселя, что даёт оценку эффективной толщины стенок в 200 мкм.

Анализ данных. Чтобы оценить, какой эффект отсеивающая решётка оказывает на качество снимка, была проведена серия экспериментов. Сравнивалась чёткость изображения объекта с использованием коллиматора и без. Для этого были сняты изображения макета тазовой области с установленными на поверхности свинцовыми маркерами размером 2 мм. Степень успешности определяется возможностью различить и измерить эти маркеры при различных условиях. Для снятия контрольного изображения без вольфрамовой решётки вместо физического удаления коллиматора перемещался макет тазовой области с маркером. Из-за маленького размера прототипа даже после небольшого вертикального смещения исследуемого объекта проекция маркера смещается в область детектора без вольфрамовой решётки. Это позволяет снимать изображения с растром и без него, не проделывая полную процедуру калибровки каждый раз. В связи с этим снимки с коллиматором и без него имеют различные координаты маркеров.

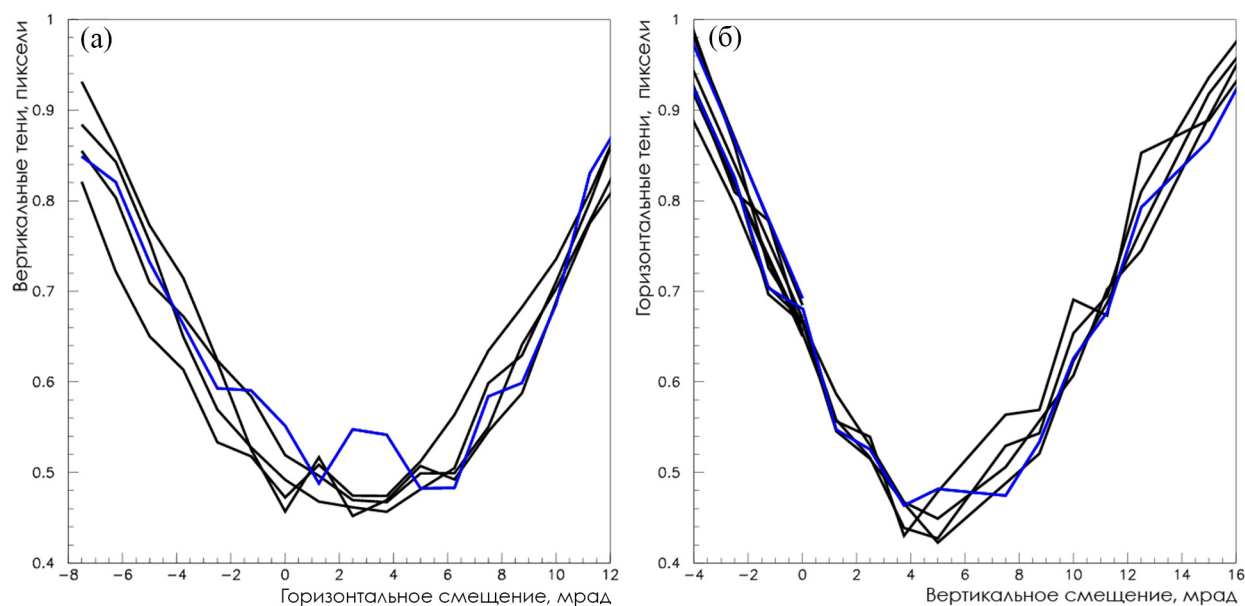


Рис. 5: Интегральный сигнал в зависимости от угла смещения.

Изображение, полученное с вольфрамовой решёткой и маркерами, показано на рис. 6. Тень коллиматора хорошо видна с расстоянием ~ 12.5 пикселей между стенками. Однако периодическую структуру можно устранить при помощи преобразования Фурье. Этот метод широко используется при обработке изображений, чтобы подчеркнуть важные черты или улучшить качество. Все изображения, показанные на последующих рисунках, содержат только область с маркерами и одинаковым образом обработаны с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье [8].

Результаты съёмки с использованием вольфрамовой решётки и без показаны на рис. 7. Тени маркеров отчётливо видны, можно измерить их размер. Тень решётки успешно удалена с изображения при помощи быстрого преобразования Фурье. Ни наличие прототипа коллиматора, ни алгоритм Фурье не приводят к искажению или ухудшению качества изображения. Более того, на изображении, снятом при установленной решётке (рис. 7(б)), наблюдается меньший уровень шума. Изменение положения маркеров связано с перемещением макета тазовой области.

Очевидно, отсеивающая решётка будет значительно улучшать изображение только при большой толщине объекта, так как в более тонких объектах содержится меньше материала для рассеяния рентгеновских лучей, и их изображения получаются отчётливыми и без использования коллиматора. Чтобы продемонстрировать возможности метода при съёмке в трудных условиях, перед исследуемым объектом был установлен

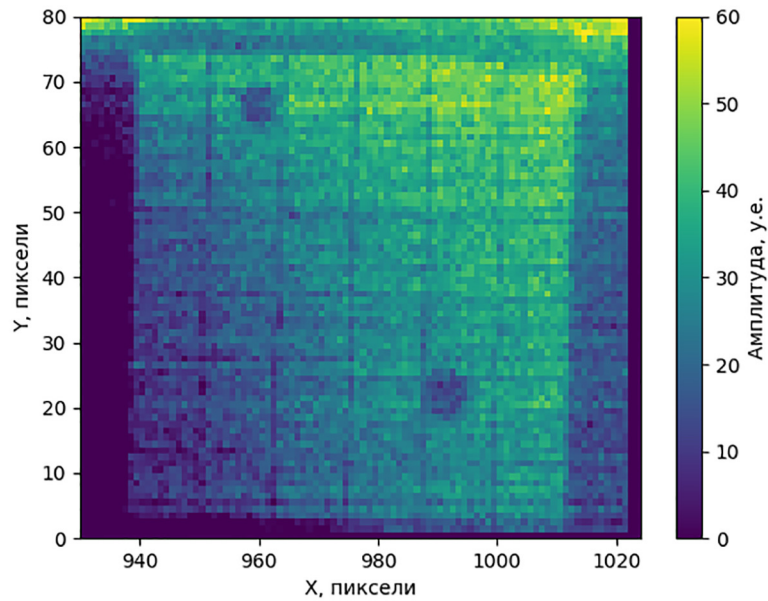


Рис. 6: Изображение отсеивающей решётки и маркеров.

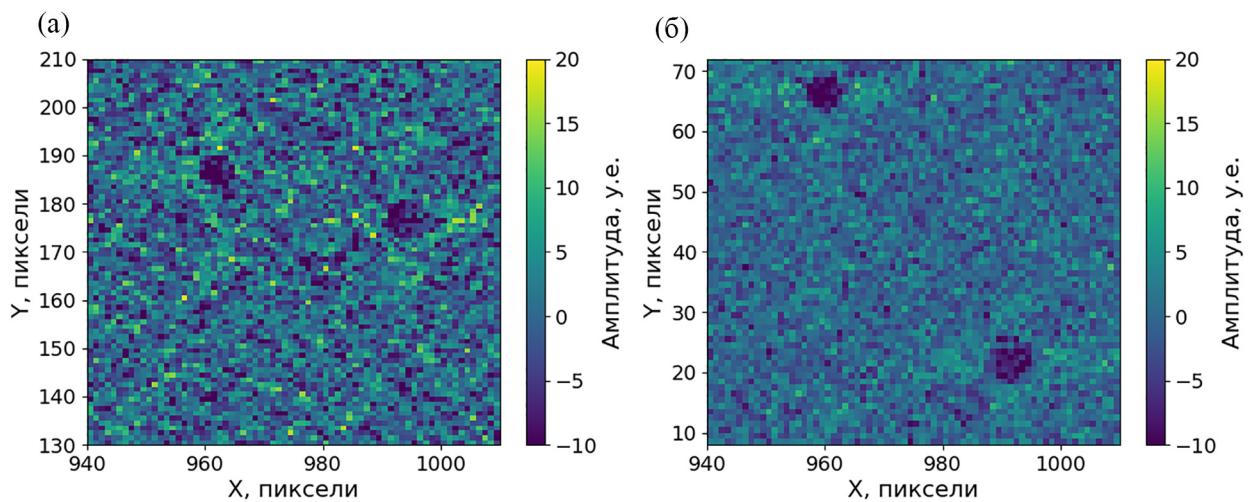


Рис. 7: Сравнение изображения без отсеивающей решётки (а) и с ней (б).

слой плексигласа толщиной 50 мм. На рис. 8 показано, как это отразилось на качестве изображения.

В этом случае польза от использования коллиматора становится более очевидной. Изображение слева состоит только из фонового шума, в то время как тени маркеров практически неразличимы. На изображении справа две тени от маркеров хорошо видны невооружённым взглядом.

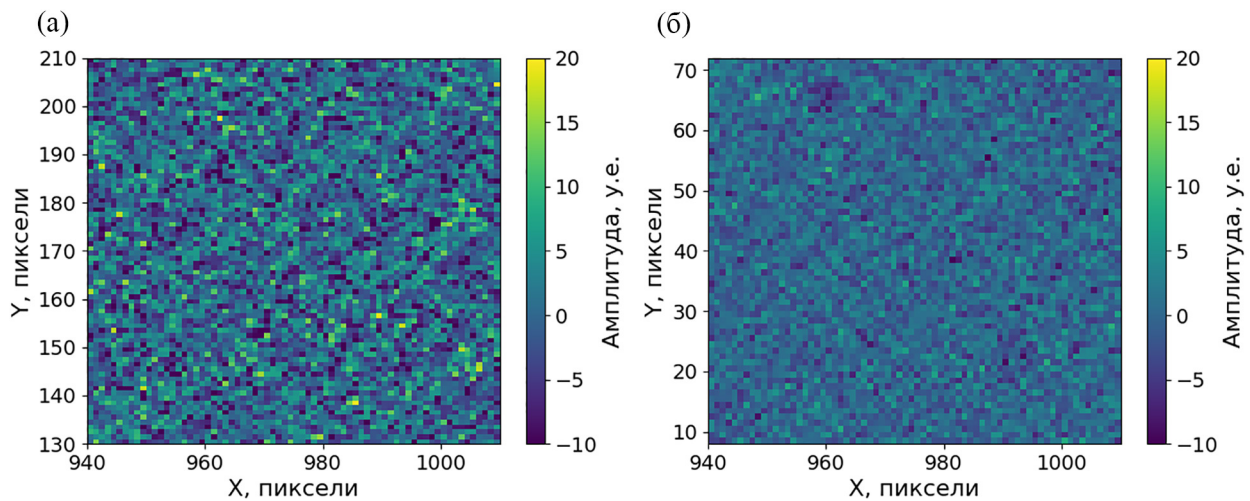


Рис. 8: Сравнение изображения без отсеивающей решётки (а) и с ней (б). Слой плексигласа толщиной 50 мм установлен в качестве дополнительного препятствия.

Заключение. С использованием разработанной НИТУ МИСИС технологии LPBF был изготовлен прототип отсеивающей решётки из вольфрама для снятия рентгеновских снимков. Эффективность его работы была исследована в экспериментах по получению изображений при помощи источника рентгеновских лучей, макета тазовой области человека с дополнительными маркерами и детектора рентгеновских лучей. Технология LPBF позволяет создать вольфрамовый коллиматор с проективной геометрией, что приводит к меньшему поперечному сечению стенок решётки с прямыми рентгеновскими лучами из точечного источника. Это ведёт к снижению облучению пациента по сравнению с традиционными коллиматорами, используемыми в медицине.

Результаты проведённых экспериментов показывают эффективность отсеивающей решётки в снижении фона и при визуальном определении маркеров. Использование коллиматора делает изображение чётче в идеальных условиях, но особенно важно при наличии какого-либо препятствия. Тени тонких вольфрамовых стенок отчётливо видны, однако не заслоняют маркеры. Эти тени могут быть удалены из изображения при помощи быстрого преобразования Фурье.

Размеры имеющегося прототипа определяются ограничениями использованной установки LPBF. Для сканирования крупных участков тела человека необходимо увеличение размера решётки, однако это не должно повлиять на эффективность методики. Для разработки отсеивающих решёток с проективной геометрией и их использования в медицинских целях необходимы дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность АО «ПРОТОМ» за предоставленную возможность проведения экспериментов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] H. Aichinger, J. Dierker, S. Joite-Barfuß, M. Säbel, Scattered radiation, in Radiation Exposure and Image Quality in X-Ray Diagnostic Radiology: Physical Principles and Clinical Applications (Berlin, Heidelberg), pp. 99–108, Springer Berlin Heidelberg (2004). DOI: 10.1007/978-3-662-09654-3_10.
- [2] F. C. Burgheim, Dr. Gustav Bucky—address in honor of his 80th birthday, in Medical Society in the City of New York, Vol. 19, pp. 156-161: Proceedings, S. Karger AG (1960). DOI: 10.1159/000405783.
- [3] V. Lehmann, S. Rönnebeck, Sensors and Actuators A: Physical **95**, 202 (2002). DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00737-3.
- [4] R. Behling, F. Grüner, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A—accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment **878**, 50 (2018). DOI: 10.1016/j.nima.2017.05.034.
- [5] C. Ren, Z. Fang, M. Koopman, et al., International Journal of Refractory Metals and Hard Materials **75**, 170 (2018). DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.04.012.
- [6] M. Desai, O. Kahaly, A. Aslam, et al., Expert Review of Medical Devices **17**, 1183 (2020). DOI: 10.1080/17434440.2020.1819789.
- [7] S. Chernyshikhin, S. Zhevnenko, V. Suvorova, et al., International Journal of Refractory Metals and Hard Materials **122**, 106699 (2024). DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106699.
- [8] J. W. Cooley, J. W. Tukey, Mathematics of Computation **19**, 297 (1965). DOI: 10.1007/978-1-4612-0667-5_9.

Поступила в редакцию 16 февраля 2026 г.

После доработки 5 марта 2026 г.

Принята к публикации 6 марта 2026 г.