

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:
 ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИСТОЧНИКОВ
 ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Линейные ускорители электронов непрерывного действия для научных
 и прикладных целей**

Д. С. Юров,^{1,*} В. И. Шведунов,^{1,†} А. С. Алимов,^{1,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 30.09.2022; после доработки 03.10.2022; принята к публикации 03.10.2022)

Статья содержит краткий обзор по ускорителям электронов непрерывного действия как для научных, так и для прикладных применений, включая сверхпроводящие ускорители. В том числе приведены результаты расчетов ускоряющей системы нового, разрабатываемого в НИИ-ЯФ МГУ в рамках данной тематики, ускорителя электронов непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью пучка 175 кВт.

PACS: 29.20.Ej. УДК: 53.06.

Ключевые слова: линейные ускорители электронов, непрерывный режим, сверхпроводимость.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310501](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310501)

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов непрерывного действия с высокочастотными ускоряющими структурами важны для проведения экспериментов в области ядерной физики, для создания комptonовских источников монохроматического рентгеновского и гамма-излучений, для создания источников синхротронного излучения четвертого поколения, а также для создания мощных компактных ускорителей прикладного назначения.

Важную роль в решении указанных задач играют следующие особенности ускорителей непрерывного действия. Во-первых, они позволяют получать прецизионные пучки электронов высокой энергии со средним током до десятков (достигнуты на настоящий момент [1])–сотен нА (новые проекты ускорителей электронов с рекуперацией энергии [2]). Благодаря отсутствию переходных процессов, присутствующих импульсным машинам как на фронтах импульсов, так и на вершине импульса, при введении обратных связей, в первую очередь в системе СВЧ–питания, на ускорителях непрерывного действия можно добиться высокой временной стабильности и предельно малого разброса по энергии электронов пучка до 10^{-4} – 10^{-5} отн. ед., при наличии в составе ускорителя системы предварительного формирования коротких пучков. Во-вторых, ускорители непрерывного действия позволяют проводить эксперименты по совпадению, так как обес-

печивают высокую скорость регистрации событий при относительно низкой загрузке детекторов за счет непрерывного следования электронных пучков. Кроме того, низкий заряд электронных пучков (по сравнению с импульсными ускорителями с тем же средним током пучка) при работе в непрерывном режиме упрощает возможность получения высокой средней мощности пучка для низких энергий в промышленных применениях ускорителей.

Ускорители электронов непрерывного действия с высокочастотными ускоряющими структурами могут создаваться на основе как нормально проводящих, так и сверхпроводящих структур. Сверхпроводящие структуры ввиду малых тепловых потерь в стенках позволяют получать высокие ускоряющие градиенты, сравнимые с ускоряющими градиентами импульсных ускорителей. Максимальный экспериментально полученный градиент для одиночных сверхпроводящих резонаторов из чистого ниобия составляет около 60 МэВ/м и ограничивается достижением критического магнитного поля на поверхности ячейек. Дальнейшее увеличение ускоряющего градиента связывается в первую очередь с изменением геометрии резонаторов и использованием других материалов вместо чистого ниобия [3]. При этом мощность тепловых потерь в стенках ускоряющей структуры (а значит, и стоимость криогенной системы) квадратично зависит от ускоряющего градиента, в то время как снижение длины и стоимости ускорителя пропорционально ему. За счет этого оптимальные с точки зрения стоимости строительства и эксплуатации ускоряющие градиенты для реальных физических установок могут иметь заметно меньшие значения. Например, для проекта международного линейного коллайде-

* E-mail: d_yurov88@mail.ru

† E-mail: shved@depni.sinp.msu.ru

‡ E-mail: alim8591@gmail.com

ра ПС оптимальный ускоряющий градиент составляет 35–40 МэВ/м [4]. Для сверхпроводящих ускорителей, работающих в непрерывном режиме, этот параметр обычно еще ниже.

В области энергий пучка несколько десятков мегаэлектронвольт использование технологии сверхпроводимости зачастую неоправданно усложняет и удорожает установку. Использование нормальнопроводящих импульсных ускорителей электронов с большим уровнем тепловых потерь в стенках в этой области энергий может быть приемлемым или даже предпочтительным вариантом.

1. УСКОРИТЕЛИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ В ДИАПАЗОНЕ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПУЧКА

Высокие потери СВЧ мощности в стенках для нормальнопроводящих ускоряющих структур делает их использование для получения пучков электронов высоких и средних энергий (свыше 10 МэВ) нецелесообразным, благодаря успехам сверхпроводящих технологий. Предельный ускоряющий градиент, достигнутый на нормальнопроводящих ускоряющих структурах, составляет около 3.5 МэВ/м в S-диапазоне, что соответствует мощности СВЧ потерь в стенках структуры около 210 кВт/м [5]. Дальнейшее увеличение ускоряющего градиента ограничивается достижением предела текучести материала ускоряющей структуры или локальным закипанием охлаждающей жидкости. Пионерские работы в области нормальнопроводящих линейных ускорителей электронов непрерывного действия с большой мощностью пучка были сделаны в 70-х годах прошлого века в лаборатории Chalk River [6]. Максимальная энергия электронов 1.5 ГэВ была достигнута в непрерывном режиме с помощью нормальнопроводящих ускоряющих структур на каскаде из трех разрезных и одного двухстороннего микротрона МАМІ [7]. Проект был начат, когда, в силу таких явлений, как мультипакторный разряд и возбуждение поперечных паразитных мод, сверхпроводящие ускоряющие структуры обеспечивали ускоряющий градиент 1–2 МэВ/м и ускоряемые токи около 1 мкА. В такой ситуации выбор в пользу нормальнопроводящих ускоряющих структур в сочетании с принципом рециркуляции пучка (разрезной микротрон на 850 МэВ содержит 90 орбит) был очевидным.

На этом же принципе базировался проект разрезного микротрона на энергию 175 МэВ и средний ток 100 мкА, разработанный в НИИЯФ МГУ в 80-х годах прошлого века [8]. Для него был построен инжектор на 6.7 МэВ [9], работающий в непрерывном режиме. На инжекторе был проведен ряд исследований по ядерной резонансной флюоресценции, однако из-за прекращения финансирования в 90-х годах дальнейшее строительство микротрона было прекращено.

Быстрый прогресс технологии сверхпроводящих ускоряющих структур, начавшийся в середине 80-х

годов прошлого века, сделал в настоящее время стандартным их использование для получения непрерывных пучков высокой энергии с относительно небольшим средним током (сотни микроампер). Для ускорителей с рекуперацией энергии, рассчитанных на ускорение среднего тока до 100 мА, использование сверхпроводящих ускоряющих структур, работающих в непрерывном режиме, также является естественным выбором. Сочетание сверхпроводящих ускоряющих структур с принципом рециркуляции пучка позволяет создавать ускорители непрерывного действия на весьма высокие энергии: ускоритель СЕВАФ на 12 ГэВ [10], проект адронно-электронного коллайдера на энергию пучка электронов 50 ГэВ [11].

2. УСКОРИТЕЛИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ В ДИАПАЗОНЕ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ ПУЧКА

Когда речь идет о низких энергиях (до 10 МэВ), ситуация с выбором типа ускоряющей структуры меняется. В данном диапазоне энергий большая часть ускорителей имеет прикладное назначение. Для таких ускорителей на первый план выходят надежность, стоимость производства и эксплуатации, сложность и сроки ремонта и т.д. При этом многие применения требуют большой мощности пучка, которой определяется производительность установки в целом. Стандартные схемы сверхпроводящих ускорителей, применяющиеся в научных установках, в таких условиях становятся нерентабельными по причине технической сложности, больших габаритов ускорительного комплекса и высоких капитальных затрат.

С этой точки зрения интересным может быть направление по созданию мощных низкоэнергетичных сверхпроводящих ускорителей электронов, развиваемое в Fermilab совместно с General Atomics и Euclid Techlab [12]. В данном случае поддержание криогенных температур должно обеспечиваться промышленными криокулерами посредством теплопроводности через прямое соединение с ускоряющей структурой. Отсутствие жидкого гелия, безусловно, значительно снизит габариты ускорителя в целом и его стоимость. Такой подход подразумевает работу в непрерывном режиме с ускоряющей структурой из ниобия, покрытого Nb_3Sn , что позволит получить добротность порядка 10^{10} при температуре 4 К и ускоряющих градиентах в несколько МэВ/м. Заявленной целью является достижение мощности пучка десятки киловатт–1 МВт при энергиях пучка от 1 до 10 МэВ [12, 13]. В данном случае максимальную мощность пучка, видимо, будут ограничивать потери частиц на стенках ускоряющей структуры (гало пучка) и сопутствующая локальная тепловая нагрузка, которая может привести к потере сверхпроводимости.

Энергопотребление криокулеров составляет около 10 кВт на 1 Вт отводимой мощности. Для

энергии пучка 10 МэВ с ускоряющим градиентом 10 МэВ/м тепловые потери в криогенной части будут равны оценочно 19.5 Вт [13], что соответствует потребляемой криокулерами мощности около 200 кВт. Даже при заявленной мощности пучка 1 МВт такой уровень затрат энергии на охлаждение не является пренебрежимо малым. Аналогичная ситуация с более низкими энергиями пучка. Несмотря на то, что динамическая тепловая нагрузка в сверхпроводящей ускоряющей структуре квадратично зависит от энергии электронов, статическая нагрузка и нагрузка, связанная с потерями электронов на стенках, будут вносить заметный вклад в КПД ускорителя.

Таким образом, как минимум для нижнего поддиапазона 1–5 МэВ использование нормальнопроводящих структур не только оправдано, но и имеет ряд преимуществ перед сверхпроводящими структурами. В частности, конструкция нормальнопроводящих структур значительно проще, а потери тока пучка в разумных пределах не приводят к серьезным последствиям для ускоряющей структуры.

Для нормальнопроводящих ускоряющих структур непрерывного действия разумными можно считать ускоряющие градиенты $\sim 1\text{--}2$ МэВ/м, что соответствует примерно диапазону 15–56 кВт/м и 15–28 кВт/мВ СВЧ потерь в стенках при вполне достижимом эффективном шунтовом сопротивлении 70 МОм/м для S-диапазона. При этом расчеты, результаты которых приведены ниже, показывают, что такие структуры могут обеспечить пучки с током более 100 мА, то есть мощностью более 100 кВт/МэВ. Большие градиенты будут приводить к неоправданным СВЧ потерям в стенках для обеспечения требуемой энергии и, как следствие, низкой эффективности установки.

3. РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ В НИИЯФ МГУ

В НИИЯФ МГУ начиная со второй половины 1980-х годов проводятся работы по созданию мощных линейных ускорителей электронов непрерывного действия S-диапазона для промышленных применений. В частности, были созданы двухсекционный ускоритель непрерывного действия на энергию 1.2 МэВ с максимальной мощностью пучка 60 кВт [14], а также прототип промышленного ускорителя с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью 25 кВт [15].

Оценки, сделанные в работе [16], показывают, что разумным видится дальнейшее увеличение тока пучка в область, где электронный КПД ускоряющей структуры будет приближаться к 1. В этом случае КПД ускорителя в целом будет определяться главным образом эффективностью источника СВЧ питания — клистрона. При этом многообещающей выглядит область энергий пучка около 5 МэВ. Мощность пучка нормальнопроводящего ускорите-

ля непрерывного действия в этой области энергий может достигать сотен кВт — мегаватта при приемлемой длине ускоряющей структуры (около 2 м) и эффективности ускорителя от розетки, близкой к 50%. В настоящее время близкие параметры пучка могут обеспечить фактически только ускорители Родотрон производства ИВА [17], которые при этом имеют большие габариты, сложную конструкцию и высокую стоимость. Мощный пучок электронов с такой энергией может быть использован для генерации тормозного излучения с большой мощностью дозы для облучения продукции с большой поверхностной плотностью.

Как дальнейшее развитие данного направления в НИИЯФ МГУ был разработан проект ускорителя непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью пучка 175 кВт. Максимальная мощность пучка была выбрана исходя из параметров доступного источника СВЧ, клистрона KU-2.45-200 производства АО «НПП «Исток» имени А. И. Шокина» [18]. Проектные параметры ускорителя приведены в таблице.

Основную сложность при переходе к большим токам пучка представляют тепловые нагрузки в ячейках ускоряющей структуры за счет потерь электронов, не захваченных в процесс ускорения. В сочетании с потерями СВЧ-мощности в стенках ускоряющей структуры данные тепловые нагрузки могут приводить к неупругим деформациям ячеек. В работе [5] показано, что при периферическом охлаждении структуры максимальная рассеиваемая в стенках СВЧ-мощность составляет 70 кВт/м, а при дополнительном охлаждении стенок между ячейками допустимая мощность СВЧ потерь поднимается до 210 кВт/м.

Для обеспечения максимальной компактности ускорителя мы включаем группирующий резонатор в состав ускоряющей структуры за счет использования низкой энергии инъекции (15 кэВ), которая, кроме того, минимизирует вероятность высоковольтных пробоев, снижает мощность инжектируемого пучка и значительно удешевляет источник питания пушки. При таком подходе основные потери электронов на стенках происходят в первых ячейках после группирующего резонатора, в том числе из-за слабой компенсации сил пространственного заряда при малой энергии электронов в начальной части ускоряющей структуры. Для снижения потерь тока пучка и сохранения тепловой нагрузки в приемлемых границах мы используем соленоидальную линзу, главная задача которой обеспечить фокусировку пучка в начальной части ускоряющей структуры. Кроме того, той же цели служит тщательная оптимизация ускоряющей структуры, в особенности ее начальной части. С точки зрения коэффициента захвата большое влияние в процессе оптимизации имеет фаза пролета синхронной частицы (вокруг которой происходит группировка после прохождения группирующего резонатора) бустерного резонатора из-за необходимости обеспечения баланса между процессами группо-

Таблица. Расчетные параметры ускорителя непрерывного действия

Энергия пучка	1 МэВ
Максимальная мощность пучка	175 кВт
Энергия инжекции	15 кэВ
Коэффициент захвата ускоряющей структуры	62%
Мощность, рассеиваемая в стенках ускоряющей структуры	23 кВт
Рабочая частота	2450 МГц
Электронный КПД	87.5%
Длина ускоряющей структуры	890 мм

вания и высокочастотной фокусировки, имеющими противоположные тенденции в зависимости от фазы. Также задачей оптимизации является уменьшение низкоэнергетического хвоста в спектре электронов на выходе из ускорителя, неизбежного при работе с низким ускоряющим градиентом.

По данному проекту был проведен полный цикл расчетов, в том числе тепловых, показавший жизнеспособность концепции ускорителей непрерывного действия с токами пучка в сотни миллиампер. Расчеты динамики пучка велись с помощью программ Parmela [19] и CST Studio [20]. Распределение электрического поля на оси ускоряющей структуры показано на рис. 1. Расчетный спектр пучка приведен на рис. 2. Суммарная мощность низкоэнергетических электронов (энергия меньше 0.8 МэВ) составляет 2,4 кВт. Небольшая мощность низкоэнергетического хвоста спектра уменьшает требования на охлаждение элементов электропровода, на которых будет происходить оседание таких электронов в процессе транспортировки от выхода ускоряющей структуры до выходного окна ускорителя.

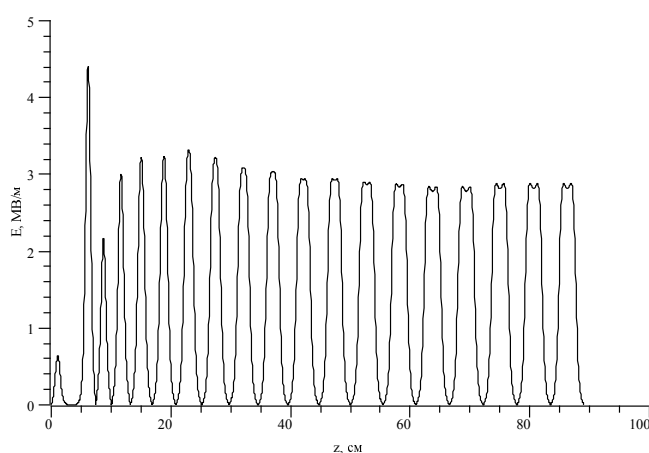


Рис. 1. Расчетное распределение электрического поля на оси ускоряющей структуры

Суммарная мощность потерь электронов на стенках ускоряющей структуры составляет 2.8 кВт. Распределение мощности потерь по ячейкам показано на рис. 3.

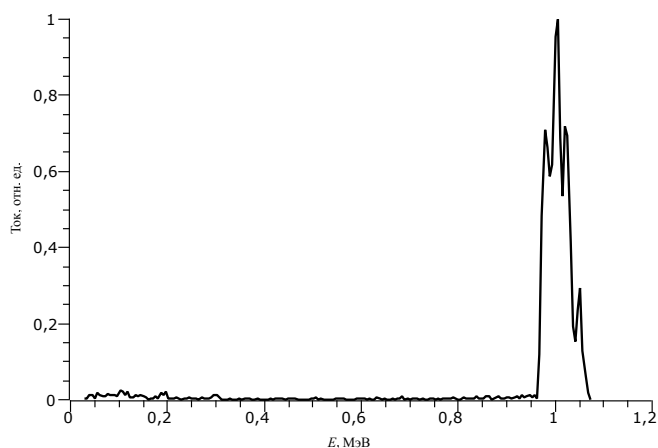


Рис. 2. Расчетный спектр пучка на выходе ускоряющей структуры

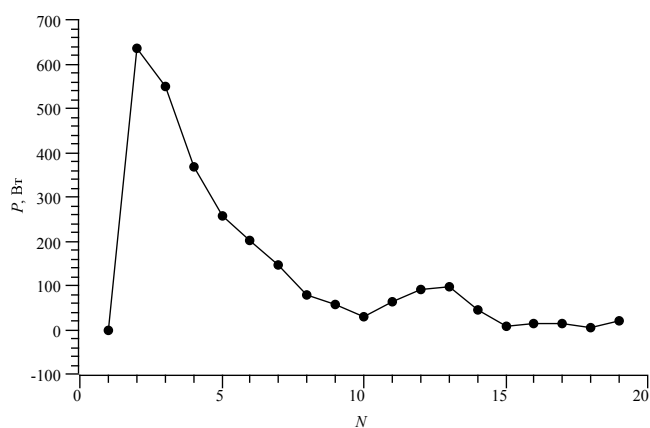


Рис. 3. Мощность потерь электронов пучка на стенках ячеек от номера ячейки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная область, где нормально проводящие ускорители электронов непрерывного действия имеют хорошие перспективы, — это генерация пучков с низкими энергиями и высокой мощностью (десятки–сотни киловатт) преимущественно для при-

кладных целей. В рамках развития данного направления в НИИЯФ МГУ разработан новый проект ускорителя непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью пучка 175 кВт. Данная разработка может быть основой

для серии мощных ускорителей электронов в диапазоне энергий 1–5 МэВ.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

- [1] Douglas D., Benson S.V., Biallas G., Boyce J. et al. A 10 kW IRFEL design for Jefferson lab. / Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago. P. 249.
- [2] Willeke F. Electron Ion Collider: Conceptual design report. Technical Report BNL-221006-2021-FORE. Brookhaven National Lab, Upton, NY, Feb. 2021
- [3] Padamsee H. History of gradient advances in SRF.
- [4] The ILC International Development Team and the ILC community. The International Linear Collider: Report to Snowmass. 2022.
- [5] Labrie J.-P., Euteneuer H. // Nucl. Instr. and Meth. 1986. **A247**, P. 281.
- [6] Fraser J.S., Kidner S.H., McKeown J., McMichael G.E. The Chalk River electron test accelerator. Proceedings of the Proton Linear Accelerator Conference, Los Alamos, 1972. P. 226.
- [7] Kaiser K.-H., Aulenbacher K., Chubarov O., Dehn M. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 2008. **A593**. P. 159.
- [8] Горбатов Ю.И., Гришин В.К., Ишханов Б.С. и др. Разрезной микротрон непрерывного действия НИИЯФ МГУ (Физическое обоснование). Издательство МГУ, Москва, 1984.
- [9] Alimov A.S., Chepurnov A.S., Chubarov O.V. et al. // Nuclear Instr. and Meth. 1993. **A326**, P. 391.
- [10] Charles E. Reece. Continuous wave superconducting radio frequency electron linac for nuclear physics research. <https://arxiv.org/abs/1606.03317>.
- [11] Agostini P. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2021. **48**, 110501.
- [12] Kephart R., Chase B., Gonin I., Grassellino A. et al. SRF, compact accelerators for industry & society. Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada. P. 1467.
- [13] Dhuley R.C., Gonin I., Zeller K., Kostin R. et al. Design of a medium energy, high average power superconducting e-beam accelerator for environmental applications. Technical report FERMILAB-PUB-21-701-DI-TD.
- [14] Alimov A.S., Ermakov D.I., Ishkhanov B.S., Shvedunov V.I. et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2002. **45**, N 5, P. 691.
- [15] Yurov D.S., Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Pakhomov N.I. et al. Industrial prototype of compact CW linac. Proceedings of RuPAC'2014, Obninsk, Russia, 2014. P. 248.
- [16] Yurov D.S., Alimov A.S., Ishkhanov B.S. et al. // Phys. Rev. Accel. Beams. **20**. 044702. (2017).
- [17] Pottier J. // Nucl. Instr. Meth. 1992. **B40/41**. 92.
- [18] <https://istokmw.ru/>.
- [19] Billen J.H., Young L.M. PARMELA. Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-96-1835. 1996.
- [20] <https://www.cst.com/>.

Continuous Wave Linear Electron Accelerators for Science and Applications

D.S. Yurov^a, V.I. Shvedunov, A.S. Alimov

Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow, 119991, Russia
E-mail: ^ad_yurov88@mail.ru

This is a brief review of continuous wave electron accelerators for science and applications, including superconducting accelerators. As well, the results of calculations are presented for an accelerating system of a new continuous wave electron accelerator (being developed at the Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University within the given project) with a beam energy of 1 MeV and a maximum beam power of 175 kW

PACS: 29.20.Ej.

Keywords: linear electron accelerators, continuous wave mode, superconductivity.

Received 30 September 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 1. Pp. 85–90.

Сведения об авторах

1. Юров Дмитрий Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-62, e-mail: d_yurov88@mail.ru.
2. Шведун Вилий Иванович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, профессор; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru.
3. Алимов Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-62, e-mail: alim8591@gmail.com.