

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.387

### СТАБИЛЬНОСТЬ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПЕННИНГА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ

© 2022 г. С. П. Масленников<sup>а</sup>, \*, И. М. Мамедов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Российская Федерация

\*E-mail: [spmaslennikov@mephi.ru](mailto:spmaslennikov@mephi.ru)

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 25.01.2022 г.

Рассмотрены импульсные режимы работы малогабаритных ионных источников Пеннинга при параметрах управления, требуемых для аппаратуры геофизических исследований скважин. Представлены результаты исследований режимов генерации импульсного разряда Пеннинга, формирования ионных потоков в зависимости от скважности импульсов питания, амплитуды тока разряда, а также в условиях пакетно-импульсного управления. Показано, что на стабильность генерации разряда Пеннинга в условиях широкой перестройки параметров системы управления оказывают влияние амплитудно-временные характеристики импульсов анодного напряжения и потенциал нулевого уровня в паузах между импульсами.

DOI: 10.31857/S0033849422070117

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Малогабаритные ионные источники Пеннинга обладают высокой надежностью, большим ресурсом, простотой конструктивного исполнения, и этим определяется их широкое применение в нейтронных генераторах для аппаратурных комплексов импульсного нейтронного гамма-каротажа. Режимы работы разрядных ячеек Пеннинга, условия извлечения ионов, характеристики генерируемых нейтронных потоков взаимосвязаны с параметрами импульсного электропитания, давлением и составом газовой среды в ионных источниках [1–5]. Для импульсных режимов работы ионных источников характерно установление определенного равновесного состояния между последовательными процессами генерации и распада плазмы газового разряда. При работе ионных источников на больших скважностях импульсов анодного напряжения наблюдается возрастание времени задержки зажигания разряда, фиксируются пропуски срабатывания разрядных ячеек, что в целом нарушает стабильность генерации нейтронных потоков.

Практика эксплуатации геофизической аппаратуры показывает, что при исследованиях отдельных участков скважин требуется применение режимов работы генераторов нейтронов с широкими диапазонами перестройки интенсивности, длительности и скважности импульсных нейтронных потоков [6]. Отдельное место в практике

применения каротажной аппаратуры занимают пакетно-импульсные режимы работы, которые позволяют проводить измерения спектральных характеристик гамма-излучения в различных временных окнах относительно момента формирования нейтронных импульсов, что позволяет увеличить объем получаемой при разведке скважин информации. В мультирежимных условиях эксплуатации геофизической аппаратуры повышаются требования к стабильности параметров генерируемых нейтронных импульсов.

Цель данной работы – экспериментальное исследование режимов генерации импульсного разряда Пеннинга, извлечение ионных потоков в зависимости от скважности импульсов анодного напряжения, амплитуды тока разряда, потенциала нулевого уровня в паузах между импульсами и в условиях пакетно-импульсного управления малогабаритных ионных источников для каротажной аппаратуры.

#### 2. СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования режимов работы ионных источников (ИИ) проведены на специализированном стенде, позволяющем воспроизводить импульсные режимы питания нейтронных трубок, близкие к реальным условиям эксплуатации в каротажном оборудовании. На рис. 1 представлена структура экспериментальной схемы для исследова-

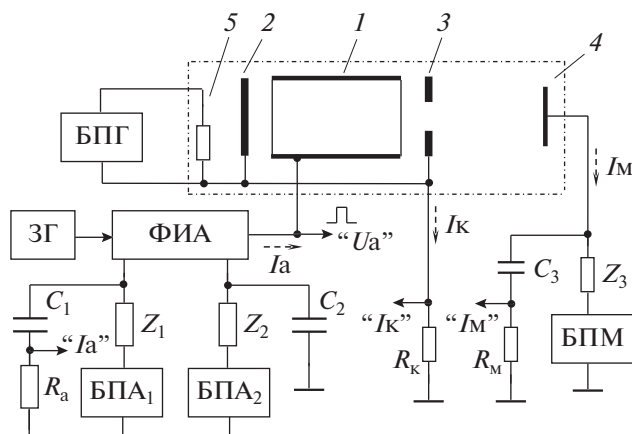


Рис. 1. Структура экспериментальной схемы: 1 – анод; 2 – катод; 3 – антикатод; 4 – мишень; 5 – геттер.

дований режимов работы ионных источников Пеннинга. Внутренний диаметр анодного цилиндра исследуемого ИИ равен  $D = 15$  мм, длина разрядной ячейки  $L = 21$  мм.

Формирователь импульсов анодного напряжения (ФИА) построен по двухтактной схеме на основе составных твердотельных коммутаторов. Управление режимом последовательного переключения коммутаторов осуществляется от одноканального задающего генератора (ЗГ), который определяет длительность и частоту повторения генерируемых импульсов напряжения [7, 8].

Электропитание силового каскада ФИА осуществляется от блока питания (БПА<sub>1</sub>), который обеспечивают зарядку емкостного накопителя ( $C_1 = 1$  мкФ) через индуктивно-резистивную цепочку  $Z_1$ . Максимальное напряжение накопителя энергии  $C_1$  и амплитуда импульсов напряжения, формируемых на выходе ФИА, составляют 3 кВ. Для обеспечения потенциала нулевого уровня на аноде ИИ в паузах между импульсами питания используется блок питания (БПА<sub>2</sub>), который заряжает накопитель энергии ( $C_2 = 10$  мкФ) через цепочку  $Z_2$ . Уровень потенциала смещения на аноде ИИ в паузах между импульсами регулируется в диапазоне  $U_{см} = -100...+300$  В.

Емкостный накопитель энергии в цепи питания мишени (вытягивающего электрода)  $C_3 = 1$  нФ заряжается через цепочку  $Z_3 = 5$  МОм от блока питания (БПМ). Максимальная величина отрицательного напряжения на мишени  $U_M = -20$  кВ. Нагрев геттера – накопителя рабочего газа – осуществляется от блока питания (БПГ).

Регистрация импульсов напряжения на аноде ионного источника  $U_a$  проводится высоковольтным делителем (Tektronix P6015A) на выходе ФИА. Для измерения параметров импульсных токов в анодной  $I_a$  и катодной  $I_k$  ветвях ионного ис-

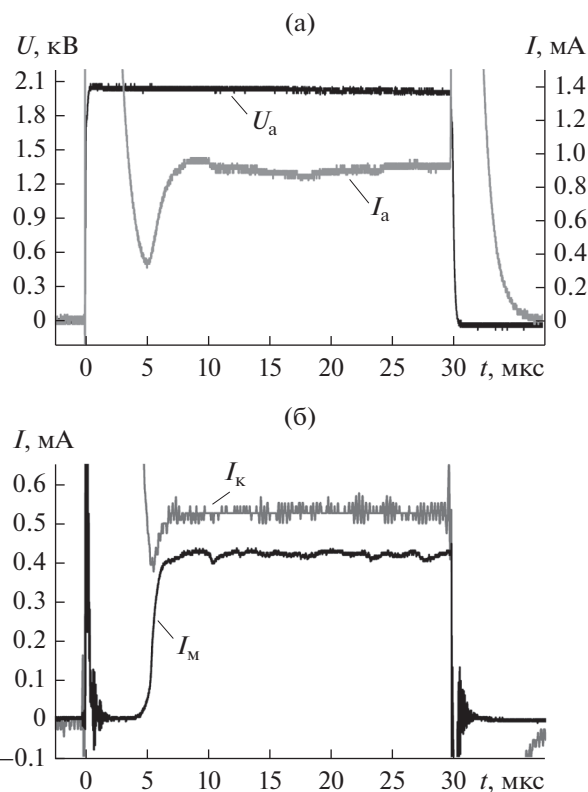


Рис. 2. Импульсы напряжения и токов: а – анодное напряжение  $U_a$  и анодный ток  $I_a$ ; б – катодный ток  $I_k$ , ток на мишени  $I_M$ .

точника используются шунты  $R_a, R_k$  с защитными диодами. Номинальные значения сопротивлений резистивных шунтов ( $\sim 10^2...10^3$  Ом) выбираются с учетом амплитудных значений импульсов тока на активной фазе разряда в ИИ. Импульсный ионный ток на мишени нейтронной трубки  $I_M$  регистрируется с помощью шунта  $R_M = 1$  кОм.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов анодного напряжения  $U_a$ , импульсов тока на аноде  $I_a$ , катоде  $I_k$  и на мишени  $I_M$  ИИ при следующем режиме работы системы питания: амплитуда импульсов  $U_a = 2$  кВ, длительность  $t_{и} = 30$  мкс, частота повторения  $F = 6$  кГц, напряжение на мишени  $U_M = -10$  кВ. Для импульсов анодного и катодного токов характерно наличие коротких бросков емкостных токов, формируемых на фронте и спаде импульса анодного напряжения.

## 2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований импульсно-периодических режимов работы ИИ было определено, что условия для стабильного зажигания разряда и перехода ИИ в устойчивый рабочий режим создавались в диапазоне

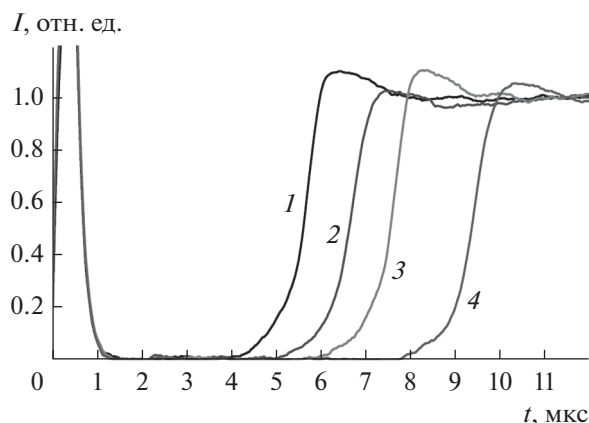


Рис. 3. Задержка зажигания разряда при скважностях импульсов  $Q = 3$  (1), 8 (2), 15 (3) и 20 (4).

давлений газа (водород, дейтерий)  $P = 3 \dots 6$  мТорр при частотах повторения импульсов анодного напряжения более  $\sim 1$  кГц.

Исследования зависимостей амплитудно-временных характеристик (АВХ) разряда от скважности  $Q$  импульсов анодного напряжения были проведены при следующих параметрах системы питания:  $U_a = 2$  кВ,  $t_{и} = 30$  мкс. Скважность импульсов регулировалась в диапазоне  $Q = 3 \dots 30$ .

Полученные данные показали, что при увеличении скважности импульсов происходит рост времени задержки зажигания разряда, которое измерялось по интервалу времени между фронтами импульсов анодного напряжения и тока разряда (или ионного тока на мишени) [9]. На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов ионного тока на мишени при скважностях импульсов анодного напряжения  $Q = 3, 8, 15$  и 20 (амплитуды токовых импульсов нормированы на единицу).

Временная шкала для представленных импульсов построена так, что в момент времени  $t = 0$  на электродную систему ИИ поступает импульс напряжения питания ( $U_a = 2$  кВ), на фронте которого на токовых импульсах возникает кратковременный ( $< 1$  мкс) выброс емкостного тока. В дальнейшем с задержкой в несколько микросекунд формировались фронты импульсов тока, что соответствовало началу активной фазы горения разряда Пеннинга. Представленные осциллограммы показывают, что для исследованного режима работы ИИ увеличение скважности импульсов в диапазоне  $Q = 3 \dots 20$  сопровождалось ростом задержки зажигания разряда с  $\sim 5$  до 10 мкс.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при импульсно-периодическом питании ИИ в его разрядной области устанавливаются равновесные условия между процессами наработки разрядной плазмы (в течение действия импульса напряжения) и процессами ее распада

(в паузе между импульсами). Уменьшение скважности импульсов при прочих равных условиях способствует сохранению заряженных частиц в межэлектродном промежутке ИИ и уменьшению времени, затрачиваемому на зажигание разряда при поступлении очередного импульса напряжения.

При изменении параметров работы системы питания (частота, скважность, амплитуда импульсов напряжения) иницируются переходные процессы в режимах работы ИИ, за время которых в разрядной ячейке устанавливаются новые равновесные условия с соответствующими АВХ разряда. Подобные переходные процессы в работе являются причиной наличия у ИИ Пеннинга времени готовности, проявляющегося в том, что после включения системы питания устройство выходит на рабочие параметры с запаздыванием по времени.

Наиболее явно стартовые режимы работы ИИ проявляются в том, что после запуска системы питания первые случаи зажигания разряда Пеннинга фиксируются с пропуском начальной группы импульсов анодного напряжения. В течение этого времени, когда разрядная ячейка фактически работает в режиме холостого хода, на ИИ может поступить от нескольких десятков до нескольких десятков тысяч импульсов напряжения, не вызывая возбуждения разряда. Результаты проведенных экспериментов показали, что увеличение длительности перерывов в работе системы импульсного питания приводило к затягиванию стартовых переходных процессов в ИИ и увеличению его времени готовности.

Первые импульсы разрядного и ионного токов, которые регистрировались в ИИ после включения, формировались, как правило, с увеличенной задержкой относительно фронта импульса анодного напряжения по сравнению с дальнейшими условиями срабатывания. И только последующие токовые импульсы приобретали повторяемые и стабильные АВХ. Этот эффект связан с большими временными затратами на зажигание первого разрядного импульса в условиях отсутствия предионизации газа в разрядной ячейке.

На рис. 4 представлены импульсы напряжения на аноде  $U_a$  и ионного тока, регистрируемого на мишени  $I_m$ , для двух первых срабатываний разрядной ячейки в стартовом режиме ИИ, зарегистрированные при следующих параметрах системы питания:  $t_{и} = 30$  мкс;  $F = 10$  кГц;  $U_a = 2$  кВ;  $U_m = -10$  кВ.

Первый токовый импульс на мишени для этого варианта срабатывания сформировался с задержкой около 13 мкс. Длительность второго и последующих импульсов ионного тока возросла до  $\sim 25$  мкс, что связано с более быстрой генерацией разряда и снижением задержки зажигания до 5 мкс.

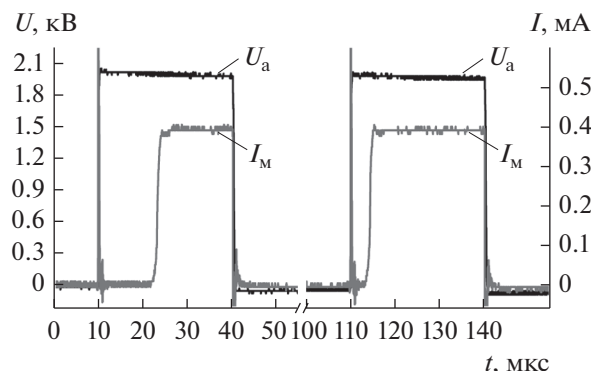


Рис. 4. Импульсы анодного напряжения  $U_a$  и ионного тока на мишени  $I_M$  в стартовом режиме.

В практику применения каротажной аппаратуры активно внедряется режим с пакетно-импульсной генерацией нейтронных потоков, отличающийся тем, что между пакетами нейтронных импульсов (с заданными числом импульсов  $N_{и}$ , длительностью  $t_{и}$ , скважностью  $Q$ ) вводится пауза с длительностью в несколько миллисекунд ( $T_{п} = 1...3$  мс). В этом режиме работы аппаратуры создается дополнительное временное окно для измерения характеристик гамма-излучения, что позволяет повысить информативность исследований параметров пластов породы. Следует отметить, что рассматриваемый режим охватывает условия импульсного питания ячейки Пеннинга с широкой перестройкой скважности импульсов и представляет собой отдельный режим работы ИИ. За время дополнительной паузы между пакетами импульсов в ИИ происходят процессы деионизации газа, что может стать причиной нарушения установившихся условий генерации импульсного разряда Пеннинга.

В ходе проведенных исследований пакетно-импульсных режимов работы ИИ было показано, что миллисекундные паузы приводили к срыву стабильности зажигания разряда Пеннинга в начале импульсных пакетов анодного напряжения. Прежде всего это проявлялось в том, что часть стартовых импульсов напряжения в пакетах сопровождалась пропусками зажигания разряда. Исследования были проведены при следующих параметрах системы питания:  $U_a = 2$  кВ,  $t_{и} = 30$  мкс,  $T_{п} = 2$  мс,  $N_{и} = 30$  и  $N_{и} = 60$ .

На рис. 5 приведены зависимости среднего числа пропущенных импульсов напряжения  $N_{ср}$  от амплитуды тока на катоде  $I_k$  для пакетно-импульсных режимов работы ИИ в диапазоне изменения тока разряда  $I_k = 0.2...0.8$  мА.

Представленные данные наглядно отображают тенденцию к увеличению числа пропущенных импульсов напряжения при снижении разрядно-

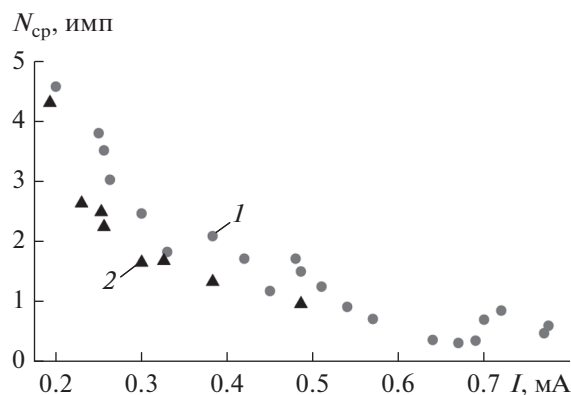


Рис. 5. Зависимости числа пропусков импульсов напряжения от тока разряда при  $N_{и} = 30$  (1) и 60 (2).

го тока, что связано с более быстрым распадом наработанной в ячейке Пеннинга плазмы и с затягиванием процессов повторного зажигания разряда. При амплитудных значениях тока  $I_k = 0.5...0.8$  мА происходило относительно стабильное зажигание разряда: в среднем терялось не более одного импульса в пакете. В то же время для разрядных токов с амплитудой  $I_k \approx 0.2$  мА среднее число пропусков включения ИИ возросло до трех–пяти импульсов. При снижении тока до уровня  $I_k \approx 0.15$  мА регистрировалось в среднем до десяти импульсов напряжения, оставшихся без генерации разряда.

Число пропущенных разрядной ячейкой импульсов напряжения в пакете подвержено большому статическому разбросу. Так, например, при амплитуде тока разряда  $I_k = 0.5$  мА на первом импульсе напряжения разряд зажигался в  $\sim 35\%$  случаев, а максимальное число пропусков зажигания не превышало десяти. При работе ИИ с током разряда  $I_k \approx 0.2$  мА на первом импульсе напряжения ячейка срабатывала с вероятностью не более 15%, при этом фиксировались отдельные случаи с пропусками зажигания для всего пакета импульсов.

Исследования импульсных режимов работы ИИ показали, что условия зажигания генерации разряда Пеннинга зависели от полярности и величины потенциала нулевого уровня, который удерживался на аноде разрядной ячейки в паузах между импульсами напряжения питания. На рис. 6 представлены импульсы ионного тока, зарегистрированные на мишени ИИ при двух значениях потенциала нулевого уровня:  $U_{ну} = -50$  и  $+100$  В. Параметры системы импульсного питания ИИ сохранялись неизменными:  $U_a = 2$  кВ,  $t_{и} = 30$  мкс,  $Q = 4$ .

Представленные осциллограммы наглядно отображают эффект сокращения времени задержки зажигания разряда, достигаемый за счет использования положительного потенциала в паузах

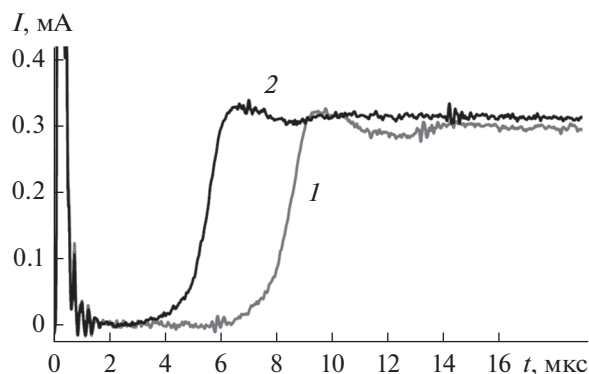


Рис. 6. Импульсы тока на мишени  $I_M$  при напряжении нулевого уровня  $U_{ны} = -50$  (1) и  $+100$  В (2).

между импульсами. Кроме того, по результатам экспериментов было показано, что положительный потенциал нулевого уровня позволяет повысить верхнюю границу диапазона регулировки скважности импульсов системы питания с сохранением условий стабильного зажигания разряда.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что сохранение положительного потенциала на аноде ИИ способствует замедлению процессов уменьшения концентрации заряженных частиц в разрядной ячейке. Наличие предионизованной среды в ИИ ускоряет процесс зажигания разряда при поступлении новых импульсов напряжения. Таким образом, при создании ИИ Пеннинга, предназначенных для мультирежимных условий эксплуатации, целесообразно применять системы питания, которые обеспечивают сохранение положительного потенциала на аноде ИИ в паузах между импульсами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования режимов генерации разряда Пеннинга и формирования ионных потоков в зависимости от скважности импульсов анодного напряжения, амплитуды тока разряда, а также в условиях импульсного и пакетно-импульсного управления малогабаритных ионных источников. Полученные экспериментальные результаты показывают, что увеличение длительности паузы в работе ионного источника приводит к появлению пропусков срабатывания и затягиванию его времени готовности. Импульсы ионных потоков, формируемые при первых срабатываниях ионного источника, имеют меньшую длительность по сравнению с его последующими импульсами. В

пакетно-импульсном режиме управления с дополнительными миллисекундными паузами повторное включение ионного источника происходит с пропусками первых импульсов анодного напряжения. Уменьшение тока разряда в ионном источнике сопровождается затягиванием повторного зажигания разряда и увеличению числа пропущенных импульсов напряжения. Успешная реализация пакетно-импульсных режимов работы малогабаритных ионных источников требует решения задач по повышению стабильности их работы в условиях широкой регулировки параметров управления. Для повышения стабильности зажигания разряда целесообразно применять системы питания, предотвращающие смену полярности напряжения и сохраняющие положительный потенциал на аноде источника в паузах между импульсами напряжения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамедов Н.В., Щитов Н.Н., Колодко Д.В. и др. // ЖТФю 2018. Т. 63. № 8. С. 1164. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.08.46304.2396>
2. Liu W., Li M., Gao K., Gu D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2014. V. 768. P. 120. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.052>
3. Zhou X., En Y., Lu J. et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2020. V. 63. Iss. 4. P. 595. <https://doi.org/10.1134/S002044122004020X>
4. Мамедов Н.В., Щитов Н.Н., Каньшин И.А. // ПТЭ. 2016. Т. 59. № 6. С. 101. <https://doi.org/10.7868/S0032816216060057>
5. Fathi A., Fegghi S.A.H., Sadati S.M., Ebrahimibasabi E. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2017. V. 850. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.028>
6. Рачков Р.С., Пресняков А.Ю., Юрков Д.И. // Атомная энергия. 2019. Т. 126. № 6. С. 334. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00569-3>
7. Масленников С.П., Серебрякова А.С. // РЭ. 2018. Т. 63. № 1. С. 80. <https://doi.org/10.7868/S0033849417010119>
8. Комаров Д.А., Масленников С.П. // РЭ. 2018. Т. 64. № 1. С. 77. <https://doi.org/10.1134/S0033849419010091>
9. Мамедов Н.В., Масленников С.П., Пресняков Ю.К. // ЖТФ. 2019. Т. 64. № 9. С. 1367. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.09.48062.34-19>