

P9-2017-78

И. А. Гузилов¹, О. Ю. Масленников¹, В. В. Кобец,
А. П. Сумбаев, Р. В. Егоров²

**ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО
ИМПУЛЬСНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО
БАК-КЛИСТРОНА 10-СМ ДИАПАЗОНА**

¹ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов»
(БТВП), Москва

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва

Гузилов И. А. и др.

P9-2017-78

Испытания высокоэффективного импульсного многолучевого БАК-клизотрона 10-см диапазона

Сообщается о результатах испытаний первого опытного образца мощного импульсного многолучевого клизотрона 10-см диапазона, разработанного в ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов». При рабочем напряжении на катоде клизотрона 51,7 кВ, токе пучка 205 А и измеренной импульсной выходной СВЧ-мощности 7 МВт максимальная эффективность клизотрона достигала 66,0%.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Guzilov I. A. et al.

P9-2017-78

Factory Acceptance Test of the High-Efficiency S-Band MBK Klystron

The results of testing the first prototype of the powerful pulse multibeam S-band klystron developed by DBT company are presented. Under the cathode voltage of 51.7 kV, beam current 205 A, and the measured RF peak pulse power 7 MW, the efficiency of the klystron reached 66.0%.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Мощные высокоэффективные клистроны в настоящее время находят широкое применение в самых различных областях научных исследований и техники. Одно из наиболее востребованных приложений клистронов в качестве источников СВЧ-мощности для будущего поколения крупных ускорительных комплексов [1] требует существенного увеличения эффективности клистронов до 60–80 %. Для повышения эффективности клистронов и их эксплуатационных качеств в последних разработках применяют целый спектр различных инновационных решений, среди которых — применение магнитных систем с периодической фокусировкой на постоянных магнитах (PPM-focusing), заменяющих фокусирующий соленоид, и использование многолучевой технологии построения электронно-оптических систем на основе многоэммиттерных катодных узлов (МВК–Klystrons).

Наряду с повышением эффективности важное значение для новых разработок имеет уровень высокого напряжения, подаваемого на катод клистроны. Снижение катодного напряжения уменьшает размеры изоляторов и массу клистронов, устраняет необходимость наличия объемных масляных танков для погружения импульсных трансформаторов, питаемых модуляторами. Такой выбор позволяет уменьшить потребление энергии, габариты, массу и стоимость клистроны.

Недавно был предложен [2] новый метод группировки пучка электронов в клистроны, позволяющий в компьютерных расчетах достичь эффективности 82–85 %. Использование метода, получившего название БАК-метод, или в английской терминологии «bunching, alignment, collecting» (BAC), позволяет при сохранении высокой эффективности уменьшить длину клистроны в 1,5–2 раза по сравнению с устройствами, представленными в [1].

При разработке нового клистроны с условным названием БТ258А (BT258A) использованы указанные выше инновационные решения и, в первую очередь, БАК-метод группировки пучка электронов. Цель настоящей работы состояла в проведении тренировки клистроны, включая СВЧ-тренировку, и тестирование клистроны в режиме генерации максимальной СВЧ-мощности.

1. ОСОБЕННОСТИ НОВОГО КЛИСТРОНА

Новый многолучевой БАК-клистрон 10-см диапазона разработан в ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» (Москва) на базе прототипа — традиционного многолучевого клистрона КИУ147А «Берег», производимого на протяжении почти 15 лет в компании ООО «Торий» (Москва). При напряжении на катоде 50 кВ и силе тока пучка 290 А клистрон КИУ147А работает с эффективностью 42 %. Целью новой разработки было улучшение эксплуатационных параметров, в первую очередь таких, как эффективность и энергопотребление. Проектные параметры нового многолучевого клистрона представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные (проектные) параметры нового клистрона БТ258 в сравнении с параметрами прототипа (КИУ147А «Берег»)

Параметр	КИУ147А «Берег» (прототип)	БТ258А	БТ258Б
Рабочая частота, ГГц	2,9985	2,9985	2,9985
Количество пучков	40	40	40
Мощность накала катодов, Вт	< 700	< 700	< 700
Напряжение катода, кВ	< 50	< 50	< 50
Ток катода, А	290	220	220
Мощность СВЧ-возбуждения, Вт	< 200	< 200	< 200
Пиковая выходная СВЧ-мощность, МВт	> 6	> 6	> 6
Длительность импульса, мкс	5–16	5–16	5–16
Частота повторения импульсов, Гц	до 300	до 250	до 300
Средняя выходная СВЧ-мощность, кВт	25	12	12
Эффективность, %	42	> 60	> 60

СВЧ-система клистрона состоит из 9 резонаторов. Расчетная оптимизация системы с использованием одномерной внутренней программы при катодном напряжении 52 кВ и силе тока пучка 195 А допускает повышение эффективности клистрона до 77 %. Система была протестирована различными программными продуктами. Одномерная программа KlyrWin [3] показала КПД 69,5 %, а двумерная программа Klys2D [4] — 66 % эффективности. Несмотря на некоторое различие результатов, расчеты в целом указывают на возможность повышения эффективности выше проектного уровня в 60 %.

Чертеж и общий вид клистрона представлены на рис. 1 и 2. Конечная длина разработанного клистрона составляет 770 мм. Общая масса клистрона 90 кг, включая массу фокусирующей магнитной системы. Фокусирующая

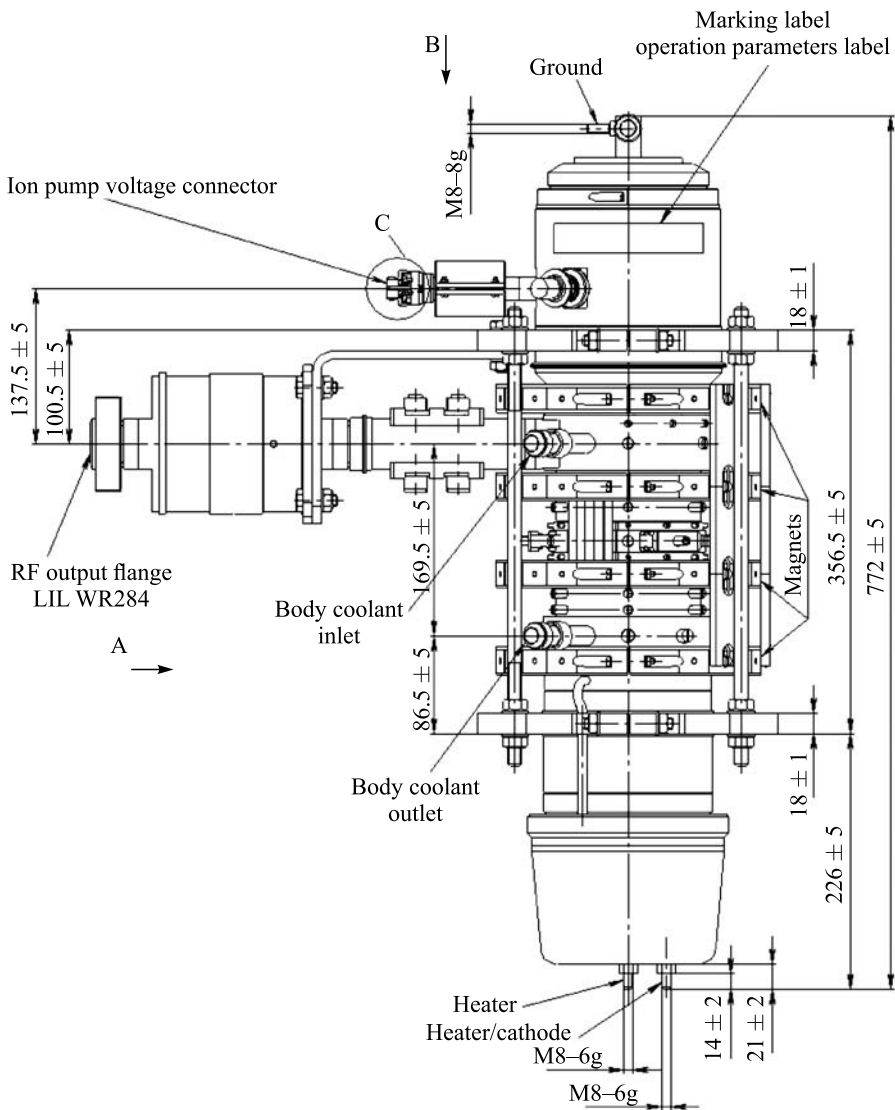


Рис. 1. Чертеж многолучевого БАК-клистрона с РРМ-фокусировкой

магнитная система состоит из 4 расположенных на расстоянии 6 см друг от друга постоянных магнитов, каждый из которых имеет длину в осевом направлении 1 см. Величина магнитного поля на оси системы составляет от 1,12 до 1,15 Тл.



Рис. 2. Общий вид многолучевого БАК-клистрона БТ258А

Катодный узел выполнен из 40 катодов круглого сечения, электронные пучки которых тесно расположены вокруг продольной оси устройства. СВЧ-мощность выводится из выходного резонатора с помощью вакуумированного волновода через СВЧ-прозрачное вакуумное окно. Отработанный пучок поглощается в массивном коллекторе с водяным охлаждением.

2. СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания клистрона проведены на полномасштабном СВЧ-стенде ускорителя ЛУЭ-200 Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. По высокому напряжению клистрон запитывался от высоковольтного импульсного модулятора линейного ускорителя ускорительного комплекса МЕА [5], который был согласован с входным импедансом клистрона.

Импульсный модулятор. Модулятор состоит из 40 модулей формирующих линий (PFN) и импульсного трансформатора. Схема модулятора представлена на рис.3. Блок из двух параллельно включенных формирующих линий коммутируется на одну из первичных обмоток импульсного трансформатора. Каждый модуль PFN выполнен из С–L-ячеек и способен генерировать

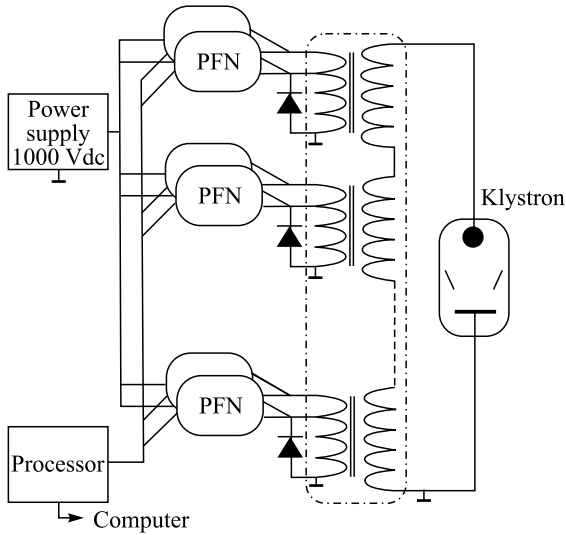


Рис. 3. Принципиальная схема модулятора линейного ускорителя МЭА

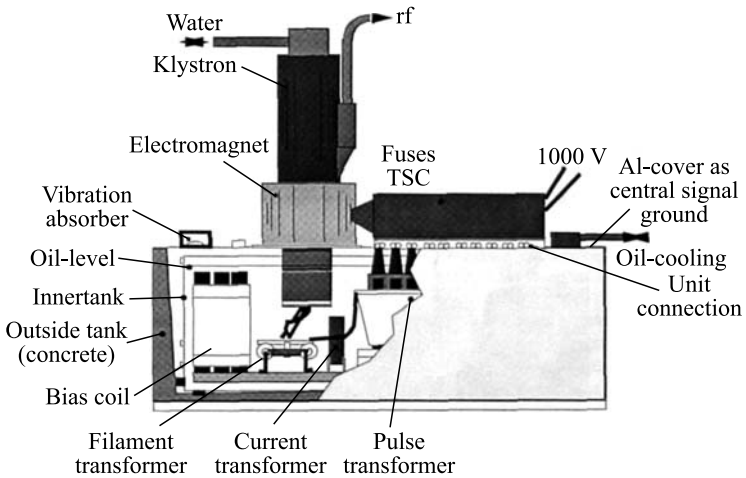


Рис. 4. Танк импульсного трансформатора модулятора линейного ускорителя МЭА

импульсы напряжения амплитудой 2 кВ и длительностью до 15–18 мкс. Магнитопровод импульсного трансформатора собран из нескольких сердечников, на каждом из которых установлена обмотка, соединенная с двумя модулями формирующих линий. Во вторичной обмотке трансформатора импульсы суммируются. При такой схеме амплитуда и частота повторения импульсов

могут изменяться в зависимости от числа включаемых блоков PFN. Импульсный трансформатор погружен в заполненный трансформаторным маслом танк (рис. 4), на который сверху устанавливается клистрон.

В танке также расположен трансформатор с выпрямителем для питания накала клистрона (мощностью до 800 Вт), дроссель системы размагничивания сердечника трансформатора, трансформатор тока для измерения тока катода клистрона и пробник для измерения импульса катодного напряжения клистрона. Параметры модулятора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры модулятора

Зарядное dc-напряжение (на входе), В	1000
Выходная импульсная мощность, передаваемая в нагрузку, МВт	До 50
Напряжение на нагрузке, кВ	До 240
Ток в нагрузке, А	До 240
Выходная средняя мощность, передаваемая в нагрузку (зависит от частоты циклов работы модулятора и ограничена «сверху» мощностью источника питания зарядного напряжения), кВт	До 30
Частота циклов (ограничена «сверху» мощностью источника питания зарядного напряжения; при высокой цикличности требуется охлаждение модулятора), Гц	До 300
Масса танка, т	Около 5
Габариты танка (без клистрона), мм	2500×1050×1005

Тренировка клистрона. На первом этапе тестирование клистрона проводилось в диодном режиме, т. е. без подачи возбуждения. Процессу тестирования предшествовал процесс тренировки с повышением катодного напряжения от уровня 10–20 до 100 % номинала. На рис. 5 представлены осциллограммы сигналов тока катода и тока коллектора клистрона в процессе тренировки с пробоем внутри клистрона и без пробоя.

В процессе тренировки измерялось токопрохождение пучка в клистроне по отношению тока коллектора к току катода. После завершения тренировки во всем диапазоне действующего напряжения (48–55 кВ) токопрохождение было не хуже 96 %.

Результаты СВЧ-тестирования клистрона. Концептуальная схема для СВЧ-тестирования клистрона представлена на рис. 6. Возбуждение клистрона осуществлялось от задающего СВЧ-генератора с частотным диапазоном 1,0–4,5 ГГц через импульсный стробируемый предусилитель. Длительность стробирующего импульса определяла длительность импульса СВЧ-мощности возбуждения. Выходная мощность измерялась через калиброванный направленный ответвитель. После аттенюатора и фильтра СВЧ-мощность посту-

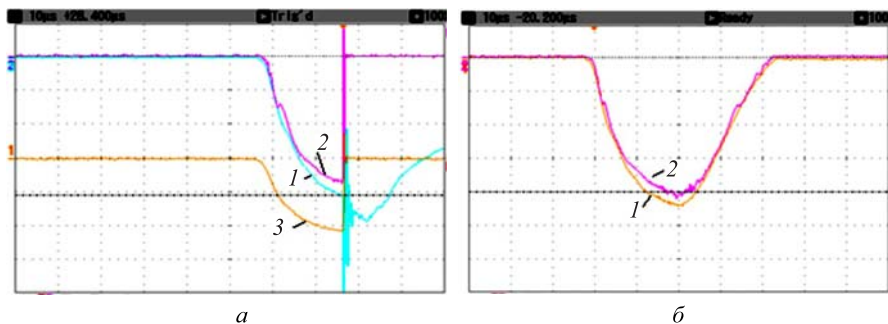


Рис. 5. Осциллограммы сигналов напряжения, тока катода и тока коллектора клистрона в процессе тренировки: а) при возникновении пробоя; б) без пробоя. 1 — ток катода клистрона, 2 — ток коллектора, 3 — напряжение на катоде клистрона. Развертка — 10 мкс/дел.

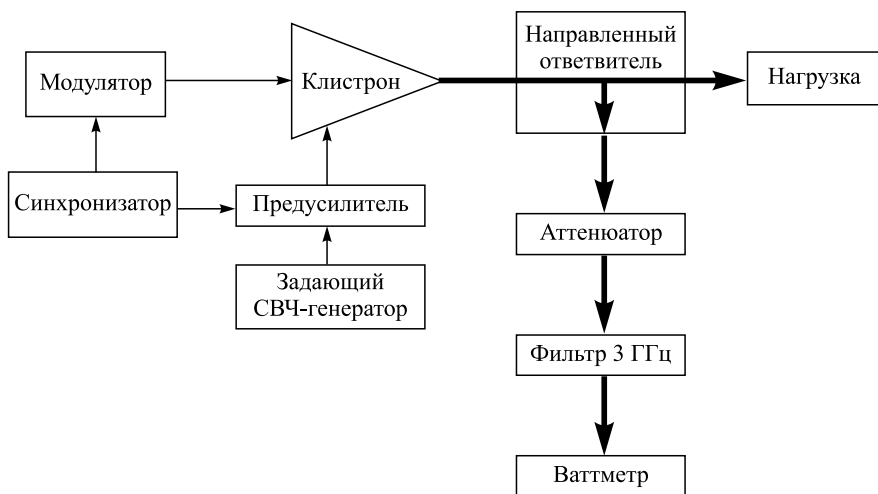


Рис. 6. Концептуальная схема СВЧ-тестирования клистрона

пала в ваттметр — измеритель мощности. Радиочастотная измерительная цепь была прокалибрована на месте. Общее измеренное ослабление мощности в измерительной цепи составляло 60 дБ.

Перед контрольными СВЧ-измерениями клистрон был оттренирован в режиме возбуждения и генерации СВЧ-мощности (длительность импульса СВЧ-возбуждения 5 мкс с частотой циклов 5 Гц). На рис. 7 представлены осциллограммы сигналов тока клистрона и огибающих СВЧ-мощности в процессе

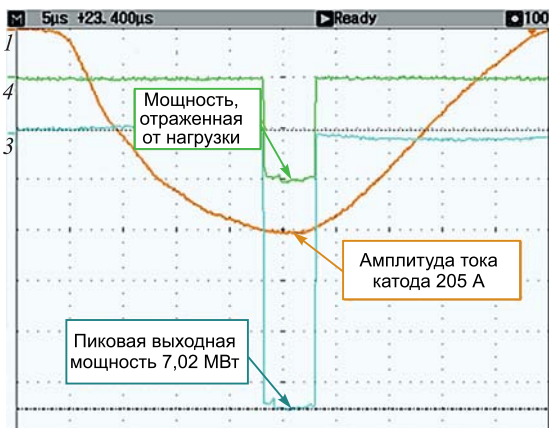


Рис. 7. Осциллограммы тока и огибающих СВЧ-мощности клистрона. Луч 1 — ток катода, луч 3 — огибающая СВЧ-мощности (падающая волна), луч 4 — огибающая СВЧ-мощности, отраженной от нагрузки. Развертка — 5 нс/дел.

СВЧ-тренировки клистрона. Результаты измерения СВЧ-мощности представлены на рис. 8 и 9.

Зависимость выходной мощности клистрона от частоты возбуждения при напряжении пучка клистрона 51,7 кВ и силе тока катода 205 А (микроперванс в пересчете на один луч составляет 0,42) представлена на рис. 8. Необходимо отметить, что самая большая импульсная выходная мощность клистрона 7 МВт была достигнута на частоте 3,004 ГГц, более высокой, чем расчетная

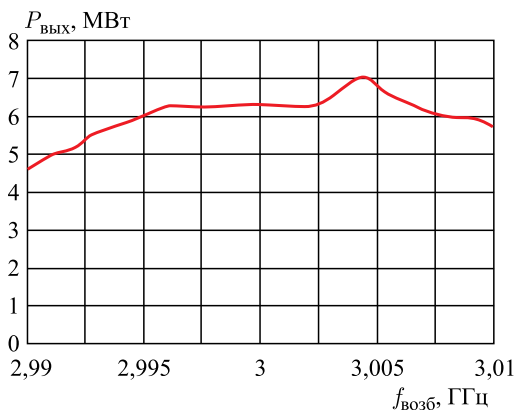


Рис. 8. Зависимость выходной мощности клистрона от частоты возбуждения при напряжении 51,7 кВ, токе 205 А и мощности возбуждения 105 Вт (в насыщении)

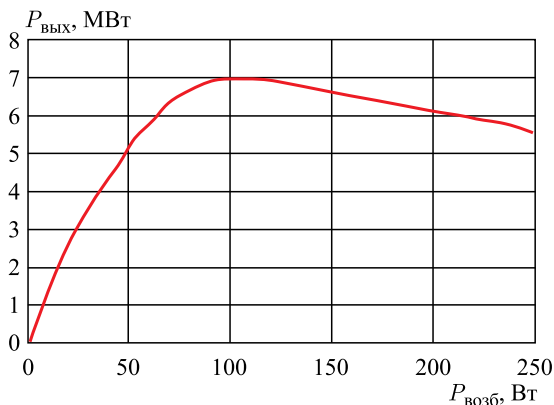


Рис. 9. Зависимость выходной СВЧ-мощности клистрона от мощности возбуждения на частоте 3,004 ГГц

частота 2,9985 ГГц. Коэффициент полезного действия на частоте 3,004 ГГц при оценке по току катода составляет 66 %, а при оценке по току коллектора 68,8 %.

График зависимости выходной мощности от мощности возбуждения при частоте возбуждения 3,004 ГГц представлен на рис.9. Максимальное значение выходной мощности клистрона 7 МВт было измерено при мощности возбуждения 105 Вт. Таким образом, коэффициент усиления СВЧ-мощности составил 48 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На полномасштабном СВЧ-стенде ускорителя ЛУЭ-200 Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ успешно проведены первые испытания опытного образца нового высокоэффективного многолучевого БАК-клистрона S-диапазона с фокусирующей системой на постоянных магнитах. В результате замены первоначального резонаторного блока клистрона-прототипа новым БАК-блоком резонаторов коэффициент полезного действия клистрона был увеличен с 42 до 66 %.

Полученные результаты подтверждают существенное повышение эффективности клистрона при использовании новой БАК-технологии группировки пучка в новом клистроне. Сравнение параметров нового клистрона с параметрами серийных клистронов известных ведущих компаний-разработчиков мощных клистронных СВЧ-усилителей показывает несомненное преимущество нового клистрона по целому ряду параметров [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Baikov A. Yu., Marrelli C., Syratchev I.* Toward high-power klystrons with RF power conversion efficiencies on the order of 90% // IEEE. Trans. Elec. Dev. 2015. V. 62(10). P. 3406–3412.
2. *Baikov A. Yu., Grushina O. A., Strikhanov M. N.* Simulations of conditions for the maximal efficiency of decimeter-wave klystrons // Techn. Phys. 2014. V. 59(3). P. 421–427.
3. *Guzilov I. A.* BAC Method of Increasing the Efficiency in Klystrons // IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), June 29 – July 4, 2014, St. Petersburg.
4. *Marchesin R., Vuillemin Q.* Thales Electron Devices. Private commun. 2016.
5. *Heine E.* The MEA modulator. NIKHEF. 12-11-98. Amsterdam, 1998.
6. *Guzilov I., Egorov R., Syratchev I., Kobets V., Sumbaev A.* Comparison of 6 MW S-band pulsed BAC MBK with the existing SBKS // IVEC-2017, Apr. 24–26, 2017, London.

Получено 13 ноября 2017 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 15.01.2018.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,99. Тираж 180 экз. Заказ № 59318.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/