

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-75-81>

УДК 621.039.68

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ТОКАМАК КТМ

А.Г. Коровиков, В.В. Яковлев, А.Т. Избасханова

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: korovikov@nnc.kz

В статье освещены вопросы возникновения ионизирующих излучений на электрофизических установках, их свойства, обоснована необходимость оснащения установки токамак КТМ стационарной, автоматизированной системой контроля радиационных полей, предложен набор инженерных решений, основанных на результатах анализа данных радиационного контроля и общих требованиях радиационной безопасности. Показано, что предложенные решения позволяют обеспечить регистрацию процесса возникновения и параметров ионизирующих излучений, а также осуществлять контроль радиационной обстановки при проведении экспериментальных работ на установке токамак КТМ.

Ключевые слова: *токамак КТМ, ионизирующие излучения, радиационный контроль, радиационная безопасность, дозиметр; плазма.*

ВВЕДЕНИЕ

Токамак КТМ – научно-исследовательская электрофизическая тороидальная установка, для которой, техническим проектом предусмотрены следующие параметры плазмы: ток 750 кА, длительность разряда до 5 с, температура от 1 до 3 кэВ (электронная температура $3,4 \cdot 10^7$ К), плотность $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Основным назначением установки является получение высокотемпературной водородной плазмы, потоки частиц и энергии от которой будут использоваться для исследования кандидатных материалов первой стенки термоядерных реакторов. Плазма в токамаке КТМ удерживается не стенками камеры, а специально создаваемым комбинированным магнитным полем.

ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ (ТОКАМАКАХ)

Основная проблема для установок подобного типа заключается в том, что плазменные процессы зависят от множества факторов и вследствие этого сложно управляемы. С ростом температуры плазмы, будет увеличиваться и скорость частиц в плазме. Опаснее всего, когда плазма внезапно охлаждается и касается стенки реактора. Это так называемый срыв плазмы. Во время срыва, то есть резкого охлаждения плазмы, падает ее проводимость, и кольцевой ток плазмы стремится уменьшиться, но из-за большого количества металла вокруг (стенки вакуумной камеры, различные металлические конструкции и т.п.) возникают наведенные токи в разных частях установки. Они индуцируют вихревое электрическое поле, препятствуя снижению тока плазмы. Это вихревое поле гораздо мощнее, чем постоянное электрическое поле самой плазмы. Благодаря вихревому полю быстрые электроны разгоняются до субсветовых скоростей и могут переносить большую часть тока плазмы. Чем меньше плотность плазмы и выше температура электронов, тем при меньших значениях электричес-

кого поля возможно ускоренное убегание электронов [1].

Неупругое рассеяние электронов в электрическом поле ионов с потерей энергии, превращается в электромагнитное излучение. Это так называемое тормозное излучение электронов – главный источник излучения плазмы при очень высокой электронной температуре. Излучение имеет сплошной спектр. Причиной значительного тормозного излучения также может быть тепловое движение в горячей разреженной плазме (с температурой от 10^5 до 10^6 К и выше). Элементарные акты тормозного излучения, обусловлены столкновениями заряженных частиц, из которых состоит плазма. Тормозное излучение плазмы с электронной температурой более 10^4 К находится в инфракрасной и видимой частях спектра, а с температурой более 10^6 К в рентгеновском диапазоне. Учитывая, что в установке температура плазмы будет находиться в диапазоне от 1,5 до 3 кэВ при плотности плазмы 10^{19} м^{-3} , следует рассматривать ионизирующие излучения за пределами вакуумной камеры, особенно при срывах тока плазмы, в рентгеновском и гамма спектрах.

Рекомбинационное излучение возникает при захвате электрона ионом, при этом освобождается энергия, равная сумме кинетической энергии свободного электрона и его энергии связи. В плазме с относительно невысокой электронной температурой рекомбинационное излучение будет преобладать над тормозным излучением, а при больших значениях электронной температуры значительный вклад будет вносить тормозное излучение.

В магнитном поле, при достаточно высоких температурах в плазме, генерируется еще один вид электромагнитного излучения – синхротронное. В отличие от тормозного и рекомбинационного излучений синхротронное имеет значительно большую длину волны, находящуюся в миллиметровой области.

Энергия и частотный спектр излучения зависит от многих факторов, так, например, присутствие в плазме даже очень незначительной примеси тяжелых ионов приводит к резкому возрастанию интенсивности излучения [2, 3].

Электромагнитное излучение имеет широкий спектр энергий и различные источники: гамма-излучение атомных ядер и тормозное излучение ускоренных электронов и др. Электромагнитное излучение становится ионизирующим, когда энергия кванта излучения превышает 13 эВ – столько нужно для ионизации атома водорода. Энергии квантов ультрафиолета недостаточно, чтобы серьезно ионизировать глубокие слои вещества, поэтому к ионизирующему излучению относят рентгеновские фотоны и гамма-кванты. Рентгеновское излучение лежит в диапазоне длин волн от 10 до 10^{-3} нм, что по энергии фотонов соответствует области от 100 эВ до 250 кэВ. При этом фотоны в синхротронном излучении (тормозном спектре) могут обладать энергией больше 1 МэВ.

Если протекание термоядерных реакций в плазме характеризуется отсутствием «порога» реакции и пространственной симметрией вылетающих нейтронов, то для ускорительных режимов со срывом тока плазмы параметры фотонейтронного излучения целиком определяются генерирующим его тормозным излучением и физикой взаимодействия электронов с «мишенью», каковой является стенка камеры или дивертор [4]. Ускорительные режимы ожидаются на всех этапах исследований, особенно при работе с плазмой круглого сечения, но также и после формирования диверторной конфигурации.

При больших энергиях тормозящихся заряженных частиц, тормозное рентгеновское излучение переходит в энергетический диапазон гамма-излучения. Тормозное гамма-излучение, как и тормозное рентгеновское излучение, характеризуется сплошным спектром, верхняя граница которого совпадает с энергией заряженной частицы, например, электрона [5].

Конструктивной особенностью установки КТМ является наличие подвижного подъемно-диверторного устройства. Это создает трудности в прогнозировании энергетических спектров излучений и их распространения. Наличие различных тестируемых материалов в токамаке КТМ также может привести к увеличению содержания ионов тяжелых металлов в плазме и, следовательно, к возрастанию мощности тормозного излучения в десятки и сотни раз, что соответственно приведет и к увеличению мощности ионизирующего излучения. Несмотря на то, что скорость генерации убегających электронов достигает максимальных значений именно в начальные моменты разряда, максимальную энергию они набирают спустя некоторое время. Всплески рентгеновского

излучения, соответствующие выходу электронного пучка на стенку камеры, появляются через ~30 мс.

В ходе проведения экспериментов с получением плазмы на токамаке КТМ необходимо с достаточной точностью определять параметры возникающих ионизирующих излучений за пределами вакуумной камеры с целью соблюдения требований нормативных правовых актов Республики Казахстан (далее – НПА РК) и выработки мер безопасности. Данные о характере, распределении радиационных полей и воздействии ионизирующих излучений могут быть использованы, как при исследовании материалов, помещаемых в вакуумную камеру, так и при выборе оборудования, приборов, размещаемых за ее пределами.

КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ТОКАМАКА КТМ

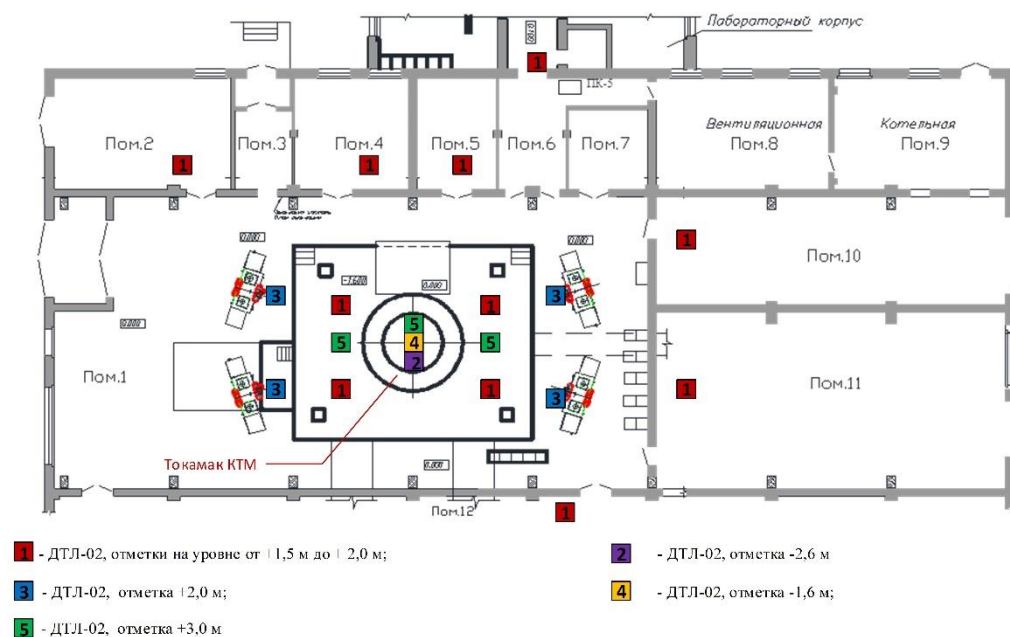
Для контроля и оценки распределения, регистрации параметров радиационных полей на установке, а также с целью характеристики ионизирующих излучений была решена задача, состоящая из нескольких направлений, требующих проведения оценок и анализа полученных данных, позволяющая сделать выводы о радиационных полях и выработать рекомендации по обеспечению радиационной безопасности при проведении экспериментальных работ на токамаке КТМ.

В качестве первого направления в решении задачи рассмотрены варианты размещения приборов радиационного контроля исходя из условий равномерного распределения ионизирующих излучений по всему объему помещения 1 (центральный реакторный зал). Вакуумная камера токамака КТМ, в которой формируется и удерживается плазма, генерирующая электромагнитные излучения, оснащена десятью экваториальными патрубками, предназначенными для установки высокочастотных антенн, для подключения систем диагностики и другого технологического оборудования. Патрубки являются своеобразными каналами вывода излучений. Излучение от участков стенок вакуумной камеры между экваториальными патрубками, в большей степени поглощается витками тороидальной обмотки магнитной системы и элементами силовой структуры.

Приборы радиационного контроля были размещены в экваториальной плоскости вакуумной камеры напротив экваториальных патрубков (3-й, 9-й, 13-й и 17-й сектора) на расстоянии до 5 м, а также в местах с наиболее вероятным при проведении экспериментов жестким рентгеновским излучением и в помещениях смежных с помещением 1 в количестве 14 точек контроля (дозиметры, отмеченные номером 1) и еще 9 точек контроля с разнесением их по геометрии с учетом размеров установки по четырем уровням: -2,6 м, -1,6 м, +2,0 м, +3,0 м (дозиметры, отмеченные номерами 2–5) (рисунок 1).



а) лабораторное здание



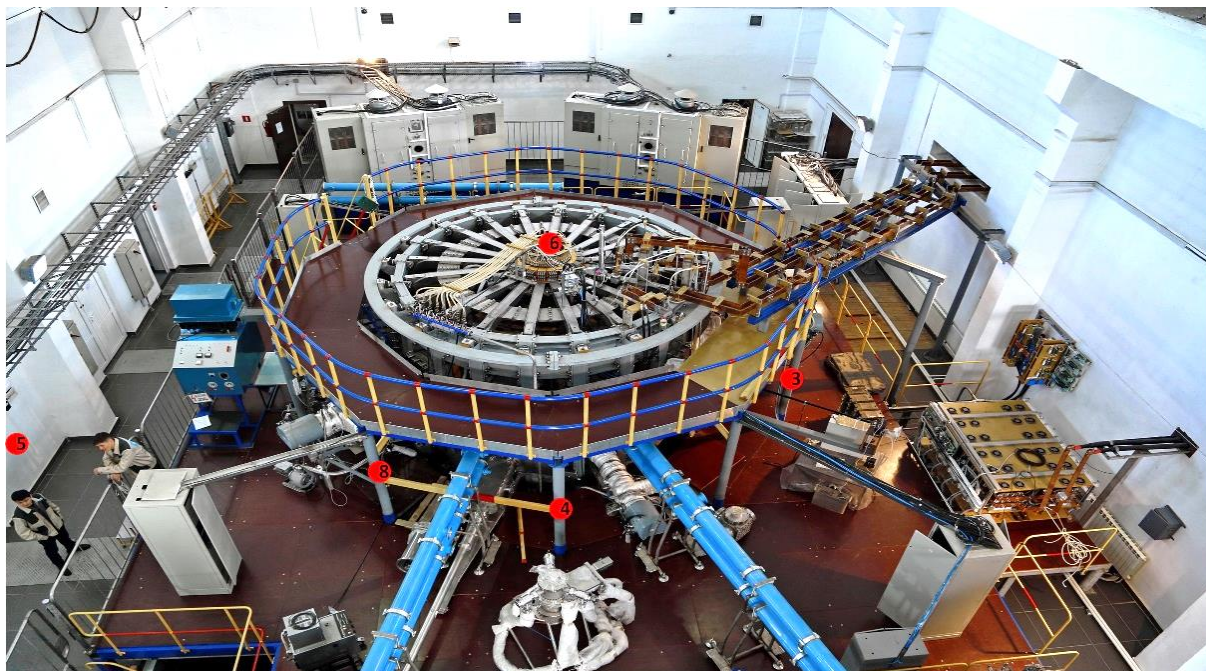
б) здание токамака КТМ

Рисунок 1. Схема размещения дозиметров в лабораторном здании и здании токамака КТМ (1 этап)

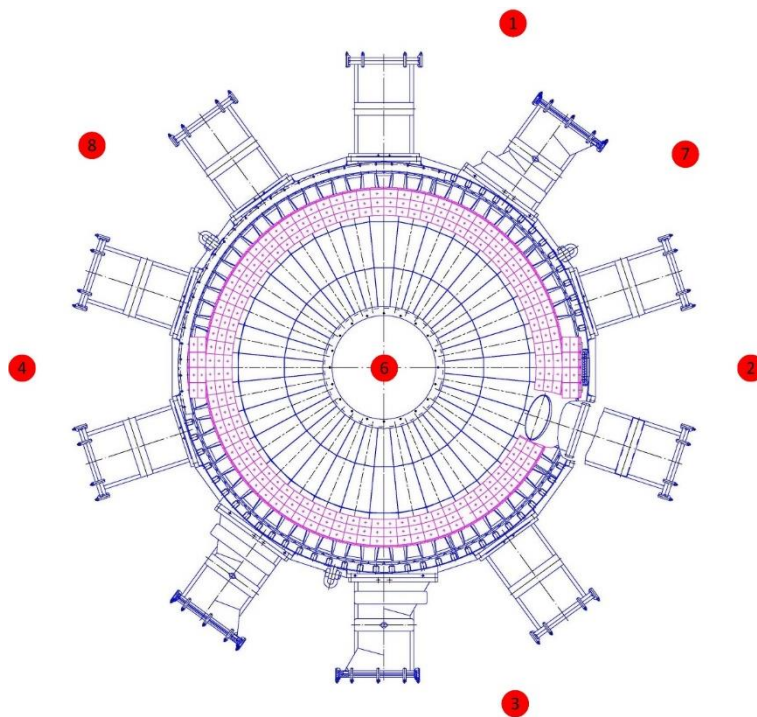
Результаты первого этапа радиационного контроля после проведения 12 пусков в 1–2 квартале 2021 года суммарной продолжительностью 2,081 секунд показали наличие радиационных полей в помещениях 1 и смежных с ним помещениях. Средняя накопленная доза составила 0,71 мЗв [6, 7]. При этом радиационные поля в лабораторном здании были на уровне естественного радиационного фона.

Целью второго этапа исследования являлось определение зависимости накопленной дозы от продол-

жительности пуска и режимов энергетических нагрузок токамака КТМ. В последующих экспериментальных кампаниях 2021–2022 гг. было сокращено количество точек контроля до 8 шт., а снятие показаний с приборов радиационного контроля, производилось после каждой группы пусков независимо от условий их проведения и достигнутых результатов. Дозиметры размещали напротив зазоров между катушками продольного поля на высоте вертикального центра вакуумной камеры в точках 1–8 (рисунок 2).



а) вертикальное расположение



б) горизонтальное расположение

Рисунок 2. Схема размещения дозиметров (2 этап)

Анализ усредненных зарегистрированных данных показал нелинейную зависимость накопленной дозы от интегральной длительности разряда, а также не симметричное распределение излучения в вакуумной камере (рисунок 3) [8–16]. Уровень и простран-

ственное распределение зависят от множества параметров: характера разряда, максимального тока, наличия срывов тока и неустойчивостей, давления рабочего газа, примесей в плазме и т.д. [17]

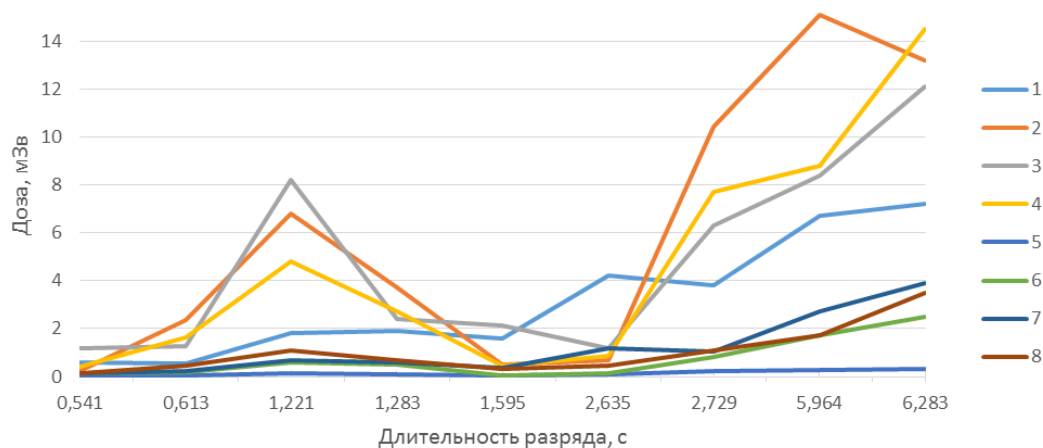


Рисунок 3. Изменение накопленной дозы от интегральной длительности разряда

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТАЦИОНАРНОЙ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ТОКАМАКА КТМ

На основании результатов радиационного контроля во время проведения экспериментальных компаний с получением плазмы на токамаке КТМ, а также учитывая конструктивные особенности установки были определены технические требования к стационарной автоматизированной системе контроля радиационных полей (далее – СКРП) и пространственному размещению приборов и детекторов радиационного контроля входящих в ее состав.

Основной целью СКРП является организация непрерывного автоматизированного процесса контроля импульсных излучений токамака КТМ в условиях динамичных, быстроменяющихся процессах, в зависимости от режимов работы установки и расположения исследуемых устройств, а также оперативного представления информации от каждого блока детектирования в любой момент времени.

С целью выбора технических и программных средств для первого этапа создания системы контроля радиационных полей был проведен обзор рынка детекторов рентгеновского и гамма-излучения, импульсных систем радиационного контроля на предмет их соответствия выработанным требованиям (минимальная длительность импульса, частотные спектры электромагнитных излучений, количество точек контроля, масштабирование и др.), а также определено пространственное размещение детекторов. При выборе детекторов излучений, принималось во внимание, быстродействие – частота повторения импульсов не менее 10 имп/с, длительность от 10 до 20 нс, диапазон измерений средней мощности амбиентного эквивалента дозы импульсного излучения ионизирующих излучений от 0,1 мкЗв/ч до 10 Зв/ч, диапазон энергий от 15 кэВ до 10 МэВ.

На следующем этапе развития системы планируется расширение регистрируемого спектра излучений, а именно дооснащение системы нейтронными детекторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, впервые полученные на токамаке КТМ, показали наличие радиационных полей в помещении 1 здания КТМ и смежных помещениях. При этом радиационные поля в лабораторном здании были на уровне естественного радиационного фона.

Уровень и пространственное распределение зависят от множества параметров и требуют дальнейшего изучения. Для регистрации параметров полей и синхронизации измерений с системой регистрации физических диагностик токамака КТМ необходимо проектирование и приобретение стационарной, автоматизированной системы контроля радиационных полей. В работе определены требования по ключевым параметрам системы и сформулированы основные инженерные решения. СКРП обеспечит необходимые измерения и регистрацию параметров и позволит контролировать состояние радиационной обстановки во время проведения экспериментальных работ на установке токамак КТМ.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» (ИРН – BR09158585).

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ в режиме омического нагрева: отчет о НИР (итоговый) / Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК; рук. Б.Ж. Чектыбаев. – Курчатов, 2021. – 114 с. – Гос. инв. № 0220РК00106.
2. Арцимович Л.А. Избранные труды «Атомная физика и физика плазмы» // Москва. – 1978. – С. 304.
3. Сивухин Д.В. Кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме // Вопросы теории плазмы – Москва. – 1964. – Вып. 4. – С. 81–187.
4. Хрипунов В.И. Оценка источников и полей излучения на установке Т-15МД // ВАНТ «Термоядерный синтез» – Москва. – 2020. – Т. 43. – Вып. 1. – С. 9–38.

5. Бекман И. Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения // учебник для среднего профессионального образования – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – С. 493.
6. «Оперативный журнал оператора пульта общего управления ТОКАМАКА КТМ», рег. № 17-280-19 (журнал №3) от 01.03.2018 г.
7. Акт радиационного контроля КТМ «ТОКАМАК» за I и II кварталы 2021 года, рег. № 31-440-02/1408вн от 01.07.2021 г.
8. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 29.11.2021 г., рег. № 31-440-02/2875вн от 13.12.2021 г.
9. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 06.12.2021 г., рег. № 31-440-02/2909вн от 20.12.2021 г.
10. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 07.12.2021 г., рег. № 31-440-02/2993вн от 29.12.2021 г.
11. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 29.06.2022 г., рег. № 31-440-02/1339вн от 08.07.2022 г.
12. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 30.06.2022 г., рег. № 31-440-02/1340вн от 08.07.2022 г.
13. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 01.07.2022 г., рег. № 31-440-02/1341вн от 08.07.2022 г.
14. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 02.07.2022 г., рег. № 31-440-02/1342вн от 08.07.2022 г.
15. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 04.07.2022 г., рег. № 31-440-02/1343вн от 08.07.2022 г.
16. Акт радиационного контроля установки КТМ во время проведения пусков 05.07.2022 г., рег. № 31-440-02/1344вн от 08.07.2022 г.
17. Заверяев В.С., Бритвич Г.И., Лебедев В.И., Луканин В.С. Исследование полей ионизирующих излучений на термоядерной установке Токамак-10 // Атомная энергия. – 1985. – Т. 59. – № 6. – С. 432–436.
2. Artsimovich L.A. Izbrannye trudy “Atomnaya fizika i fizika plazmy” // Moscow. – 1978. – P. 304.
3. Civukhin D.V. Kulonovskie stolknoveniya v polnost'yu ionizovannoy plazme // Voprosy teorii plazmy – Moscow. – 1964. – Issue 4. – P. 81–187.
4. Khripunov V.I. Otsenka istochnikov i poley izlucheniya na ustanovke T-15MD // VANT “Termoyadernyy sintez” – Moscow. – 2020. – T. 43. – Issue 1. – P. 9–38.
5. Bekman I. N. Atomnaya i yadernaya fizika: radioaktivnost' i ioniziruyushchie izlucheniya // uchebnik dlya srednego professional'nogo obrazovaniya – 2-e izd., ispr. i dop. – Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2020. – P. 493.
6. “Operativnyy zhurnal operatora pul'ta obshchego upravleniya TOKAMAKA KTM”, reg. No. 17-280-19 (zhurnal №3) ot 01.03.2018 g.
7. Akt radiatsionnogo kontrolya KTM “TOKAMAK” za I i II kvartaly 2021 goda, reg. No. 31-440-02/1408vn ot 01.07.2021 g.
8. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 29.11.2021 g., reg. No. 31-440-02/2875vn ot 13.12.2021 g.
9. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 06.12.2021 g., reg. No. 31-440-02/2909vn ot 20.12.2021 g.
10. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 07.12.2021 g., reg. No. 31-440-02/2993vn ot 29.12.2021 g.
11. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 29.06.2022 g., reg. No. 31-440-02/1339vn ot 08.07.2022 g.
12. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 30.06.2022 g., reg. No. 31-440-02/1340vn ot 08.07.2022 g.
13. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 01.07.2022 g., reg. No. 31-440-02/1343vn ot 08.07.2022 g.
14. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 02.07.2022 g., reg. No. 31-440-02/1342vn ot 08.07.2022 g.
15. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 04.07.2022 g., reg. No. 31-440-02/1343vn ot 08.07.2022 g.
16. Akt radiatsionnogo kontrolya ustanovki KTM vo vremya provedeniya puskov 05.07.2022 g., reg. No. 31-440-02/1344vn ot 08.07.2022 g.
17. Zaveryayev V.S., Britvich G.I., Lebedev V.I., Lukanin V.S. Issledovanie poley ioniziruyushchikh izlucheniya na termoyadernoy ustanovke Tokamak-10 // Atomnaya energiya. – 1985. – T. 59. – No. 6. – P. 432–436.

REFERENCES

1. Issledovanie protsessa formirovaniya plazmennogo shnura tokamaka KTM v rezhime omicheskogo nagreva: otchet o NIR (itogovyy) / Filial “Institut Atomnoy Energii” RGP NYaTs RK; ruk. B.Zh. Chektybaev. – Kurchatov, 2021. – 114 p. – Gos. inv. No. 0220RK00106.

**КТМ ТОКАМАГЫНЫҢ ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНДА
ИОНДАУШЫ СӘУЛЕЛЕНУ ӨРІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ**

А.Г. Коровиков, А.Т. Избасқанова, В.В. Яковлев

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада электрофизикалық қондырғыларда иондаушы сәулелердің пайда болу мәселелері, олардың қасиеттері, КТМ токамак қондырғысын стационарлық, радиациялық өрістерді бақылаудың автоматтандырылған жүйесімен жаратқандыру қажеттілігі негізделген, радиациялық бақылау деректерін талдау нәтижелері мен радиациялық қауіпсіздіктің жалпы талаптарына негізделген инженерлік шешімдер жиынтығы ұсынылған. Ұсынылған шешімдер иондаушы сәулелердің пайда болу процесі мен параметрлерін тіркеуді қамтамасыз етуге, сондай-ақ КТМ токамак қондырғысында эксперименттік жұмыстар жүргізу кезінде радиациялық жағдайды бақылауды жүзеге асыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Түйін сөздер: КТМ токамагы, иондаушы сәулелену, радиациялық бақылау, радиациялық қауіпсіздік, дозиметр, плазма.

**INVESTIGATION OF IONIZING IRRADIATION FIELDS AT THE KTM TOKAMAK
ELECTROPHYSICAL INSTALLATION**

A.G. Korovikov, A.T. Izbaskhanova, V.V. Yakovlev

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper highlights the issues of the ionizing radiation occurrence at electrophysical installations, their properties, substantiates, the need to equip the KTM Tokamak installation with a stationary, automated radiation field monitoring system, offers a set of engineering solutions based on the results of the analysis of irradiation monitoring data and general irradiation safety requirements. It is shown that the proposed solutions will allow recording the process of occurrence and parameters of the ionizing irradiation, as well as monitoring the irradiation situation during the experimental work on the KTM Tokamak installation.

Keywords: KTM Tokamak, ionizing irradiation, irradiation control, irradiation safety, dosimeter, plasma.