

УДК 544.54

ВЫРАВНИВАНИЕ ДОЗЫ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ОБЕЗВРЕЖИВАНИИ ПРИМЕСЕЙ В ВОДЕ

© 2025 г. А. В. Пономарев*

ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

*E-mail: ponomarev@ipc.rssi.ru

Поступила в редакцию 25.10.2024 г.

После доработки 25.10.2024 г.

Принята к публикации 20.11.2024 г.

Рассмотрена перспективная конструкция облучателя для высокоскоростной электронно-лучевой обработки сточных вод в струйном режиме. Показана целесообразность сочетания технических решений, ранее по отдельности использованных в конструкции ускорителей ЭЛВ-12 и Электрон-10. Высокоскоростная струя воды (>1 м/с) облучается с двух сторон в зазоре между двумя пучковыми окнами, направляющими пучки под углом $\alpha = 45\text{--}60^\circ$ к плоскости струи. При этом полезная толщина струи, обеспечивающая максимальную равномерность облучения электронами с энергией 1, 2 и 3 МэВ, а также наименьшие потери энергии пучка, составляет 5.2, 13.1 и 20.8 мм при $\alpha = 60^\circ$ и 4.2, 10.7 и 17 мм при $\alpha = 45^\circ$ соответственно. Рассматриваются варианты одновременного облучения двух и четырех струй воды.

Ключевые слова: ускоритель электронов, сточные воды, электронно-лучевая обработка, двухстороннее облучение, кривые глубина–доза

DOI: 10.31857/S0023119325020071 EDN: ALTWEZ

ВВЕДЕНИЕ

Колоссальные объемы промышленных и бытовых отходов требуют мощного оборудования для их обезвреживания и переработки. Одним из наиболее экологически безопасных способов обезвреживания загрязнений в воде и в воздухе является электронно-лучевая обработка (ЭЛО), т.е. конверсия опасных примесей в безопасное состояние под действием электронных пучков, генерируемых ускорителями электронов [1, 2]. Химическая эффективность ЭЛО при решении экологических задач доказана многочисленными исследованиями. Однако современные типовые ускорители электронов пока имеют чрезмерно высокую стоимость и невысокую мощность пучка (до 150 кВт), что делает их неконкурентоспособными в системах крупнотоннажного обезвреживания отходов [3–5].

С точки зрения экологического применения лучшими показателями экономичности и мощности пучка обладают ускорители постоянного тока (DC-ускорители). Типовые DC-ускорители разрабатывались преимущественно для облучения полимерных пленок и других рулонных материалов [6–8]. Вместе с тем эти же ускорители можно использовать для ЭЛО относительно медленных потоков воды – до 10^3 м³ в сутки при дозе до 5 кГр. Однако типичный расход сточных вод и выбросных газов на муници-

пальных и крупных промышленных очистных сооружениях на порядки выше, что выдвигает задачу повышения мощности ускорителей в число весьма насущных.

Другая актуальная задача состоит в обеспечении равномерности облучения высокоскоростных потоков воды. При скорости менее 1 м/с (в режиме самотека) равномерность облучения воды может достигаться за счет ее непрерывного интенсивного перемешивания (например, посредством барботажа). Для более скоростных потоков воды этот прием не подходит. В радиационной технологии пленочных материалов, где перемешивание невозможно, равномерность поглощения энергии излучения достигается за счет выбора подходящей толщины материала, не превышающей $E/3\rho$, где E – энергия пучка (МэВ); ρ – плотность материала (г/см³). Толщина $d = E/3\rho$ (“полезный пробег”) соответствует равенству поглощенных доз на лицевой и тыльной сторонах материала, облучаемого перпендикулярно к его поверхности [8, 9]. Однако “полезный пробег” d составляет всего $2/3$ от “максимального пробега” R ($R = E/2\rho$), т.е. значительная часть энергии пучка теряется [4, 8, 9]. В случае электронно-лучевого модифицирования полимеров такие потери компенсируются благодаря существенному улучшению свойств материала и, соответственно, повышению его потребительской стоимости. Однако в случае

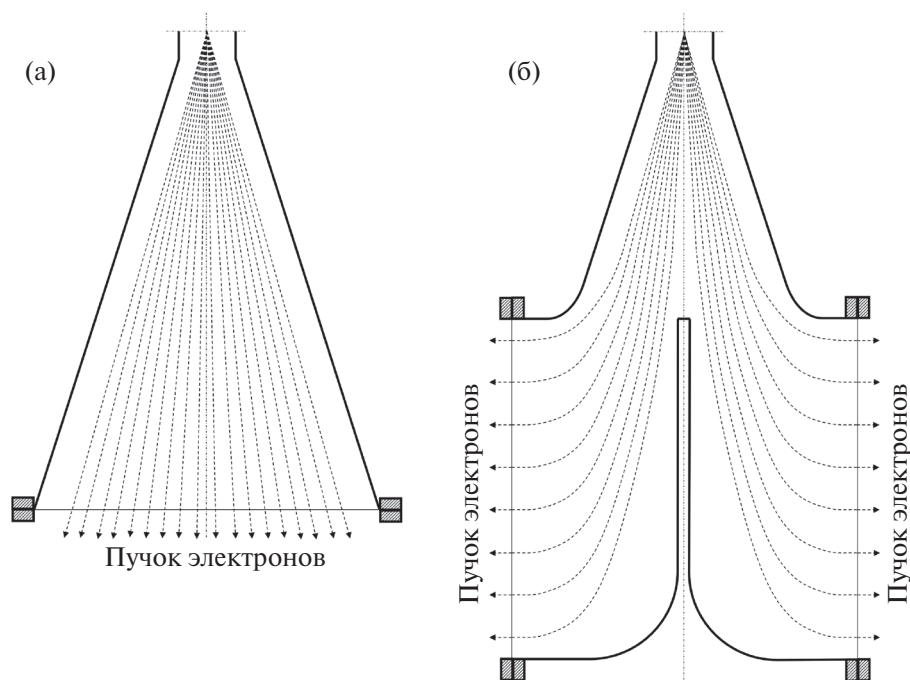


Рис. 1. Распределение пучка электронов внутри сканера ускорителей ЭЛВ-12 (а) и Электрон-10 (б).

ЭЛО сточных вод или выбросных газов на такую компенсацию рассчитывать не приходится.

Равномерное поглощение излучения может также достигаться посредством облучения несколькими электронными пучками с разных сторон. При этом чем меньше генераторов излучения, тем экономичнее ЭЛО. Успешность внедрения ускорителей в очистку воды и газов особенно сильно зависит от их экономичности и компактности. В случае ЭЛО воды высокоскоростной поток (>1 м/с) создается за счет принудительной подачи воды в струйном режиме (в виде широкой струи) [2, 3, 9]. Высокоскоростная струя воды непригодна ни для перемешивания, ни для переворачивания. Поэтому ее наиболее равномерная и экономичная ЭЛО возможна лишь за счет облучения струи с двух сторон. В данной работе рассматриваются наиболее привлекательные варианты высокоскоростного двустороннего облучения воды, подаваемой в зону облучения в струйном режиме.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ

Ранее в опытно-промышленных установках использовалось одностороннее облучение воды. Наиболее производительная установка была разработана для ЭЛО сточных вод текстильного производства [2, 3, 8, 10], где источником излучения служит ДС-ускоритель ЭЛВ-12, состоящий из трех ускорительных трубок, питаемых одним высоковольтным генератором [6, 7]. Каждая ускорительная трубка генери-

рует вертикальный электронный пучок (рис. 1а), направляемый на горизонтальную струю воды. Энергия электронов E составляет 1 МэВ, а толщина струи соответствует максимальному пробегу этих электронов ($R = E/2\rho$), т.е. около 4 мм [2, 10]. При использованном варианте одностороннего облучения неравномерность дозы составляет почти $\pm 100\%$, т.е. часть растворенных загрязнений не участвует в радиолитических превращениях или подвергается действию чрезмерно низкой дозы [9]. На практике для нормативной очистки воды в таком варианте требуется использовать дозу в несколько раз выше, чем это следует из эксперимента, основанного на равномерном облучении. В свою очередь, облучение с двух сторон обеспечило бы существенно меньшую неравномерность дозы (до $\pm 25\%$) и, следовательно, более эффективную деградацию загрязняющих веществ.

Существующая конфигурация ускорителя ЭЛВ-12 не предназначена для двустороннего облучения. Однако она может быть модифицирована с использованием технических решений, реализованных в ускорителе Электрон-10 [11, 12], где пучок, генерируемый одной ускорительной трубкой, разделяется на две части и изгибается таким образом, чтобы обеспечить облучение в двух противоположных направлениях (рис. 1б). Например, комбинирование трех ускорительных трубок, предусмотренных в ЭЛВ-12, с системой магнитного деления и сканирования пучка, используемой в Электрон-10, могло бы послужить основой для двустороннего облучения воды.

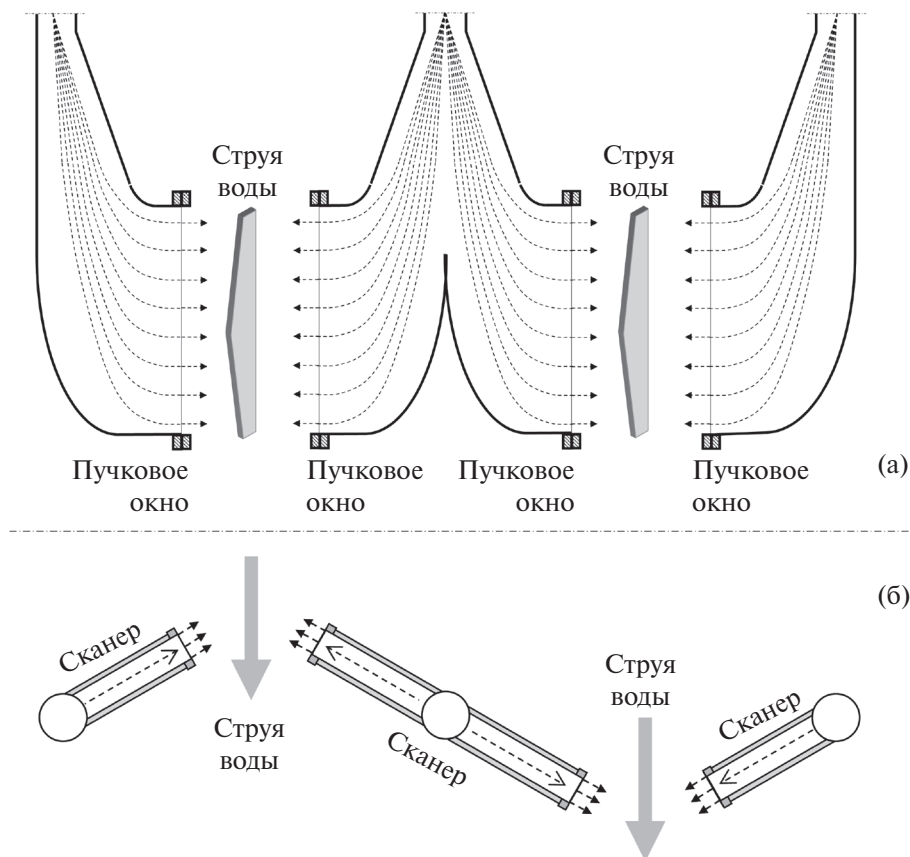


Рис. 2. Вертикальная (а) и горизонтальная (б) проекции электронных пучков относительно струй воды (б) при использовании модифицированного облучателя.

Схематично работу такого модифицированного облучателя можно представить следующим образом (рис. 2). В центральном сканере вертикальный пучок делится пополам. Каждая из половин изгибается в горизонтальном направлении и сканируется в вертикальной плоскости. В обоих боковых сканерах достаточно магнитного изгиба пучка в горизонтальном направлении без его раздвоения. Промежуток между пучковыми окнами сканеров может использоваться для двух вертикально-ориентированных водяных струй. При этом пучки целесообразно направлять под углом к струям (рис. 2б). Наличие угла между плоскостью пучка и плоскостью струи целесообразно, в частности для удобства обслуживания пучковых окон (замена фольги, обслуживание системы охлаждения фольги и т.п.). Как и исходная конструкция, модифицированный вариант ЭЛВ-12 пригоден для облучения $\sim 10^4$ м³ в воды сутки (при дозе 1–2 кГр).

ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА В СТРУЕ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ОБЛУЧЕНИИ

Целесообразный угол (α) между осью струи и осью пучка составляет от 45 до 60° (рис. 3). Рас-

стояние от струи до пучкового окна также определяется в основном удобством обслуживания окна (20–30 см между пучковыми окнами). Далее будет рассматриваться вариант облучателя, где на торце пучкового окна установлена 50 мкм Тi фольга, а толщина воздушного зазора между струей и пучковым окном составляет 100 мм. В этом случае полезный пробег электронов или полезная толщина струи ($d = E/3\rho$) для варианта одностороннего облучения составляют 2.5, 6.3 и 10 мм при энергии электронов (E) 1, 2 и 3 МэВ соответственно. Облучение с двух сторон при $\alpha = 90^\circ$ соответствует полезному пробегу почти в 2.2–2.4 раза большему [8]. Так, полезная толщина струи, облучаемой с двух сторон, составляет 6, 15 и 24 мм соответственно, а локальные дозы на обеих сторонах струи и в ее центре одинаковы.

Учитывая угол $\alpha = 45\text{--}60^\circ$, поперечная толщина струи d^α (длина отрезка А–А на рис. 3), обеспечивающая максимальную равномерность распределения дозы, оказывается меньше, чем при перпендикулярном облучении: $d^\alpha = d^{90} \cdot \sin(\alpha)$, где d^{90} – полезная толщина струи, облучаемой перпендикулярно ($\alpha = 90^\circ$) с двух сторон. Рис. 3 иллюстрирует влияние угла между пучком и струей на полезную толщину

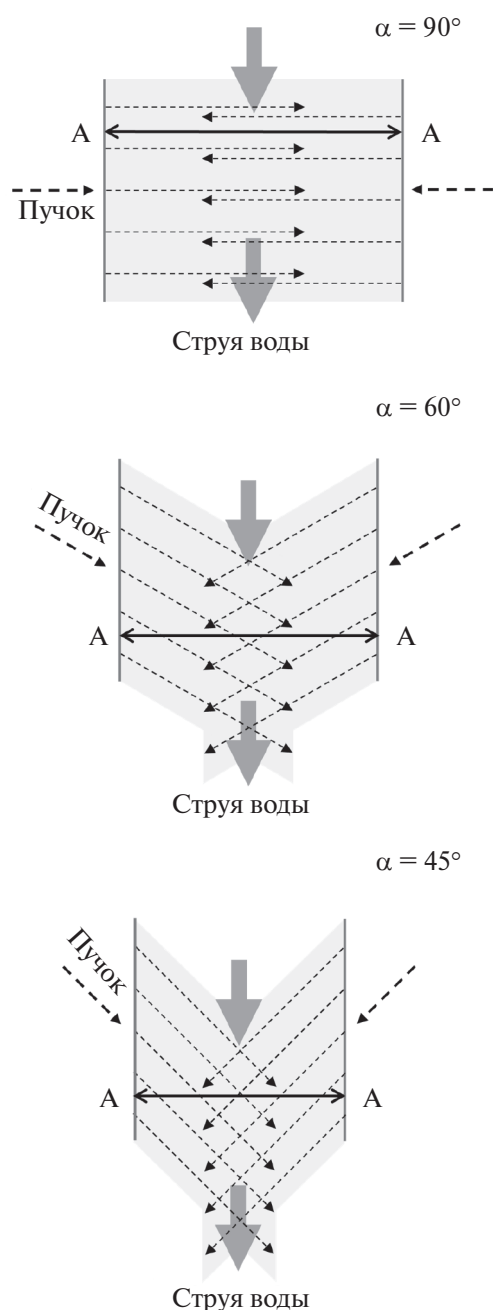


Рис. 3. Влияние угла α на полезную толщину струи (d^α , линия А—А').

струи и на плотность поглощения энергии в поперечном сечении струи. Показан упрощенный пример, когда одинаковое количество электронов (одинаковое количество стрелок) попадает на одну и ту же боковую поверхность струи, но угол между пучком и струей разный: 45, 60 и 90°. Вдоль своего начального направления пучок вносит одинаковую интегральную энергию независимо от α , но плотность потока электронов в поперечном сечении струи, расположенном под углом $90-\alpha$ (количество

электронов, пересекающих А—А на единицу длины А—А), выше. Видно, что при угле $\alpha < 90^\circ$ количество электронов, проникающих через единицу длины А—А, увеличивается с уменьшением угла. Соответственно, большее количество электронов переносит больше энергии.

На рис. 4 показаны кривые “глубина—доза” при двустороннем облучении струи воды в зависимости от E и α при условии, что локальные дозы на поверхностях и в центре струи одинаковы. Представленные профили рассчитаны путем суммирования экспериментально измеренных кривых глубинной дозы, соответствующих одностороннему облучению воды [4, 8, 9] для случая использования 50 мкм Тi фольги на пучковом окне и 100 мм воздушного зазора между струей и пучковым окном. Согласно рис. 4 для 1, 2 и 3 МэВ полезная поперечная толщина струи составляет 5.2, 13.1 и 20.8 мм при $\alpha = 60^\circ$ и 4.2, 10.7 и 17 мм при $\alpha = 45^\circ$ соответственно.

ОБЛУЧЕНИЕ ЧЕТЫРЕХ СТРУЙ ОДНИМ ОБЛУЧАТЕЛЕМ

Рассмотренный выше пример (рис. 2) соответствует использованию трех ускорительных трубок для облучения двух струй воды. Такой вариант обусловлен расположением ускорительных трубок в одну линию в соответствии с существующей конфигурацией ускорителя ЭЛВ-12. Однако было бы желательно, чтобы число ускорительных трубок было бы, по крайней мере, равно числу облучаемых струй воды. Соответствующая гипотетическая схема представлена на рис. 5 (горизонтальная проекция). Четыре пучковых сканера ориентированы перпендикулярно друг другу. Каждый сканер создает два противоположно направленных пучка, как уже было показано для центрального сканера на рис. 2. Струи воды движутся между сканерами под углом $\alpha = 45^\circ$. Таким образом, четыре ускорительные трубки служат для облучения четырех струй воды.

Все 4 ускорительные трубки могут питаться от одного высоковольтного генератора, как это предусмотрено в конструкции ускорителя ЭЛВ-12. Более того, по мнению разработчиков ускорителей, не существует непреодолимых технических препятствий для размещения и питания нескольких ускорительных трубок внутри одного высоковольтного сосуда. Такая конфигурация могла бы обеспечить как максимальную компактность облучателя, так и высокую равномерность деградации растворенных загрязняющих веществ в облучаемом потоке.

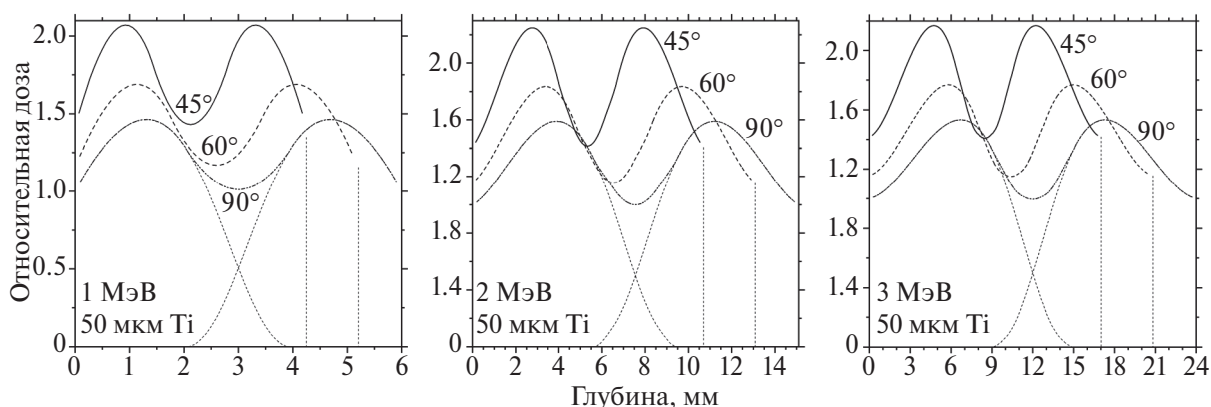


Рис. 4. Кривые глубинной дозы в струе воды при двухстороннем облучении электронным пучком под разными углами α .

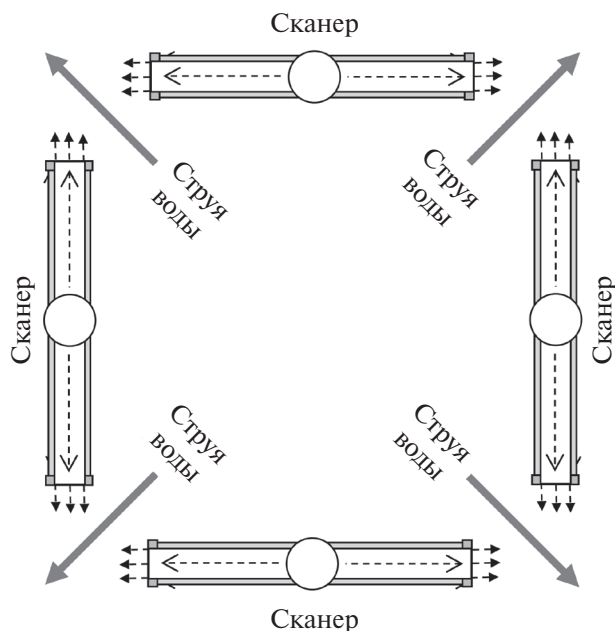


Рис. 5. Расположение 4-х пучковых сканеров относительно 4-х струй воды (горизонтальная проекция).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электронно-лучевая обработка, будучи довольно новым, высокотехнологичным инструментом в области очистки сточных вод и дымовых газов, все еще испытывает трудности роста, присущие инновационным направлениям [1, 2]. Насущная необходимость создания мощных электронных ускорителей экологического назначения тесно переплетается с задачей создания соответствующей подпучковой аппаратуры и рациональных принципов согласования мощных пучков с высокоскоростными потоками [1–4]. Очистка сточных вод и дымовых газов предъявляет специфические требования к облучению, которые нетипичны для хорошо развитых технологий обработки высокомолекулярных материалов. Эта специфика заключается прежде всего в относительно

малых дозах, непрерывных потоках и значительно более высоких скоростях потока. Электронно-лучевая очистка огромных потоков сточных вод выглядит тем привлекательнее, чем меньше ускорителей используется и чем компактнее эти ускорители. Более того, очистка сточных вод и дымовых газов не является коммерческой технологией, обещающей немедленную прибыль. Как следствие, при проектировании ускорителей и систем очистки воды и газа под пучком необходимо учитывать эту специфику.

Высокая химическая эффективность электронно-лучевой обработки доказана на многочисленных реальных и модельных образцах сточных вод и дымовых газов. Теперь эти доказательства необходимо дополнить снижением стоимости мощности пучка, практическим обеспечением высокой равномерности распределения дозы в объеме и повышением производительности ускорителей. В данной работе показана возможность максимально равномерной и компактной электронно-лучевой обработки сточных вод со скоростями более 1 м с^{-1} посредством модифицированных вариантов электронных ускорителей. Представленные подходы целесообразно учитывать при разработке новых мощных облучателей и очистных установок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность разработчикам ускорителей В.П. Овчинникову и Н.Г. Толстуну за обсуждение материала. Автор выражает благодарность Центру коллективного пользования физико-химическими методами исследований Института физической химии и электрохимии РАН за предоставленное оборудование.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы 122011300061-3 РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chmielewski A.G.* // Radiat. Phys. Chem. 2023. V. 213. P. 111233.
2. *Ponomarev A.V., Ershov B.G.* // Environ. Sci. Technol. 2020. V. 54. P. 5331.
3. *Kim Y., Ershov B.G., Ponomarev A.V.* // High Energy Chem. 2020. V. 54. P. 462.
4. *Berejka A.J., Cleland M.R.* // Industrial Radiation Processing with Electron Beams and X-rays. IAEA & IIA, Vienna, 2011.
5. *Meeroff D.E., Bloetscher F., Shaha, B.* // Radiat. Phys. Chem. 2020. V. 168. P. 108541.
6. *Domarov E.V., Vorobyov D.S., Golkovsky M.G., Golubenko Y.I., Korchagin A.I., Kuksanov N.K. et al.* // Sib. J. Phys. 2019. V. 14. P. 5.
7. *Kuksanov N.K., Salimov R.A., Fadeev S.N., Nemytov P.I., Golubenko Y.I., Korgachin et al.* // Electrotech. Electron. 2018. V. 53. P. 165.
8. *Woods R., Pikaev A.* // Applied radiation chemistry. Radiation processing. Wiley, NY, 1994.
9. *Bludenko A.V., Ponomarev A.V.* // High Energy Chem. 2024. V. 58. P. 429.
10. *Han B., Kyu Kim J., Kim Y., Seung Choi J., Young Jeong K.* // Radiat. Phys. Chem. 2012. V. 81. P. 1475.
11. *Valtman D., Ivanov A., Nikiforov E., Ovchinnikov V., Svinin M., Tolstun N.* // Vopr. At. Nauk. i Tekhniki. Yad. Issled. 1999. V. 3. P. 16.
12. *Tolstun N.G., Efremov A.V., Ivanov A.S., Kuzhlev A.N., Maznev V.P., Machecha A.I. et al.* // 24th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2014. Obninsk, Russia, 2014. P. 327.

DOSE EQUALIZATION IN ELECTRON BEAM NEUTRALIZATION OF IMPURITIES IN WATER

A. V. Ponomarev*

A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, Moscow, Russia

**E-mail: ponomarev@ipc.rssi.ru*

A promising design of an irradiator for high-speed electron beam treatment of wastewater in a jet mode is considered. The feasibility of combining technical solutions previously used separately in the design of the ELV-12 and Electron-10 accelerators is demonstrated. A high-speed water jet (>1 m/s) is irradiated from both sides in the gap between two beam windows, directing the beams at $\alpha = 45\text{--}60^\circ$ angle to the plane of the jet. In this case, the useful thickness of the jet, which ensures maximum uniformity of irradiation with 1, 2 and 3 MeV electrons, as well as the lowest beam energy losses, is 5.2, 13.1 and 20.8 mm at $\alpha = 60^\circ$ and 4.2, 10.7 and 17 mm at $\alpha = 45^\circ$, respectively. Options for simultaneous irradiation of two and four water jets are being considered.

Keywords: electron accelerator, wastewater, electron beam treatment, double-sided irradiation, depth–dose curves