

ОСОБЕННОСТИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

© 2020 г. Ю. Ким^а, Б. Г. Ершов^б, А. В. Пономарев^{б, *}

^а*EV Tech Co., Ltd. 170-9 Techno 2-ro Yuseong-gu Daejeon, 34028 Republic of Korea*

^б*ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский просп., 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия*

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

Поступила в редакцию 01.07.2020 г.

После доработки 01.07.2020 г.

Принята к публикации 06.07.2020 г.

Существующие технологические ускорители электронов и проектируемые для них радиационно-химические сосуды дают возможность облучения не более 20 тысяч м³ воды в сутки, что во много раз меньше практических потребностей. В то же время есть технические предпосылки для создания более мощных ускорителей, пригодных для крупнотоннажной водоочистки. В свете обострения проблемы обезвреживания биологически опасных примесей интерес к электронно-лучевой очистке воды стремительно повышается. Рассмотрены варианты компоновки ускорителей и реакционных сосудов для многократного повышения производительности электронно-лучевой очистки воды.

Ключевые слова: ускоритель электронов, пучковое окно, сточная вода, струйный режим облучения, производительность

DOI: 10.31857/S002311932006008X

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обезвреживания биологически опасных примесей в воде неуклонно обостряется. Все чаще сточные воды содержат примеси, которые устойчивы к обычным методам очистки. Со своей стороны, обработка воды ускоренными электронами является обоснованным и проверенным методом обезвреживания практически любых биологически опасных загрязнителей в сточных водах [1–3]. Промежуточные продукты радиолиза имеют более высокие окислительно-восстановительные потенциалы по сравнению с обычными химическими веществами, используемыми при очистке воды (рис. 1). Радиолитические интермедиаты способны трансформировать или отщеплять функциональные группы и, тем самым, инактивировать загрязняющие вещества. Кроме того, радиолиз, в зависимости от условий, может быть подходящим как для окислительной, так и для восстановительной дегградации примесей [1]. Обладая уникальным очищающим эффектом, радиолиз, при условии его высокой продуктивности и экономичности, может быть использован для замены или совершенствования обычных методов очистки воды. Однако производительность каждого облучателя должна соответствовать масштабам современных очистных сооружений.

Несмотря на достоинства метода радиационно-химической очистки воды, его практическая применимость и экономическая эффективность остаются предметом обсуждения из-за высокой стоимости ускорителей и их относительно низкой мощности [4–6]. Совершенствование ускорителей электронов подчиняется в первую очередь задачам развития прибыльных радиационно-химических технологий модифицирования полимеров и стерилизации. Для этих технологий нужны относительно высокие поглощенные дозы и конвейерное перемещение материалов [7–11]. Поэтому параметры электронного пучка у соответствующих технологических ускорителей хорошо адаптированы к характеристикам конвейеров, используемых в производственных линиях. В современных реалиях, радиационно-химическая очистка сточных вод и водоподготовка не сулят коммерческой выгоды и, как следствие, ускорителям для радиолитического обезвреживания примесей в воде уделяется намного меньше внимания. По сравнению с модифицированием полимеров и стерилизацией, очистка сточных вод требует более низкой поглощенной дозы (обычно от 0.5 до 5 кГр), но гораздо более высокой скорости облучения. Муниципальные образования и промышленные предприятия производят от тысяч до миллионов кубометров сточных вод в сутки. Со-

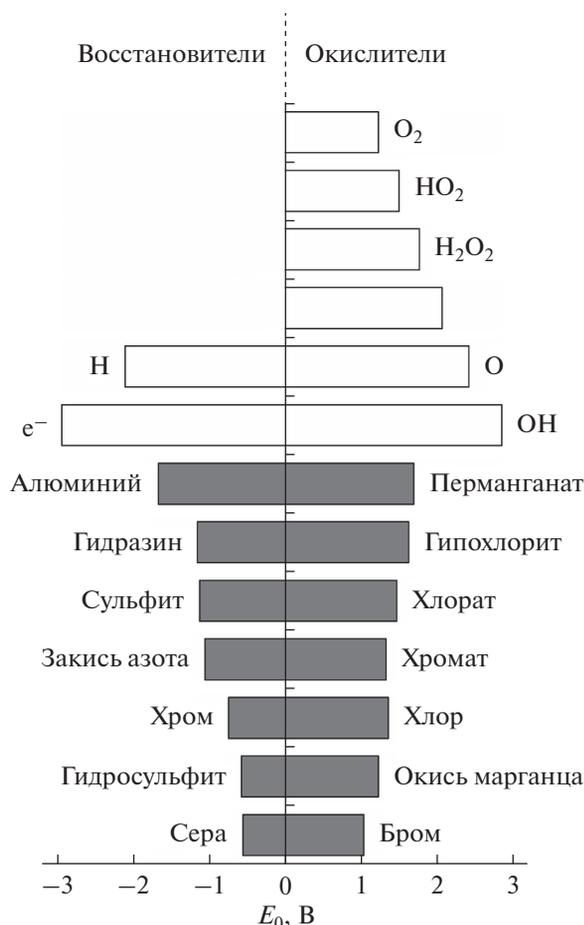


Рис. 1. Стандартные окислительно-восстановительные потенциалы E_0 продуктов радиолитиза воды и некоторых химикатов.

ответственно, очистка ускоренными электронами (электронно-лучевая очистка) может стать привлекательной при условии появления ускорителей, обеспечивающих скоростное облучение больших потоков воды. Таким образом, становится все более очевидной необходимость обратиться к проблемам совершенствования оборудования для электронно-лучевой очистки сточной воды. Данная работа представляет технологическую точку зрения на возможность крупнотоннажной очистки стоков с использованием ускорителей электронов.

СОГЛАСОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И ПОТОКА ВОДЫ

Конфигурация ускорителя и его положение относительно потока воды играют ключевую роль в производительности электронно-лучевой установки. Электронный пучок выводится в атмосферу через выпускное окно ускорителя, снабженное металлической фольгой. Фольга отделяет вакуумную камеру ускорителя от атмосферного воздуха. Несомненно,

согласование параметров электронного пучка с параметрами потока воды является основной задачей при проектировании блока электронно-лучевой обработки. В данной работе рассматривается облучение потока воды, сформированного в широкую высокоскоростную струю (струйный режим облучения) под вертикальным электронным пучком (рис. 2). Струйный режим облучения соответствует наиболее высокой производительности водообработки. Расход облучаемой воды зависит от требуемой поглощенной дозы D , энергии E и мощности M электронного пучка, а также от его пространственного распределения. Эти параметры определяют ширину B , толщину d и линейную скорость v потока воды в зоне облучения.

Ускоритель является самым дорогим элементом установки, а энергия пучка E — наиболее значимым фактором в ценообразовании ускорителя. Поэтому большинство пилотных установок электронно-лучевой очистки воды были основаны на сравнительно низкой энергии пучка, $E \approx 1$ МэВ [3–6, 12–14]. В то же время $E \approx 1$ МэВ вызывает технологические трудности из-за низкой проникающей способности таких электронов (пробег $R = 4.37$ мм при $E = 1$ МэВ). Такой низкий пробег приемлем, прежде всего, для облучения воды в режиме самотека, когда вода может интенсивно перемешиваться механически или путем барботирования. Но самотек, где линейная скорость ограничена величиной $v = 0.5–0.7$ м/с, не подходит для крупнотоннажной электронно-лучевой обработки воды. В свою очередь, в струйном режиме (рис. 2), использующем принудительную подачу воды в зону облучения, скорость потока может достигать 5 м/с. Однако небольшая толщина струи, соответствующая малому пробегу электрона при $E \approx 1$ МэВ, чревата высокой вероятностью засорения сопла, образующего струю, неравномерностью скорости воды по ширине струи, нестабильностью толщины струи из-за абразивного воздействия взвешенных частиц на сопло, и т.д. Таким образом, увеличение энергии пучка и, тем самым, увеличение пробега электронов, представляется предпочтительным с технологической точки зрения.

Энергия пучка E в наиболее экономичных ускорителях постоянного тока не превышает 5 МэВ. Соответственно, дальнейшее увеличение их мощности M может быть достигнуто в основном за счет увеличения тока I пучка, поскольку $M = E \times I$. Сегодня наибольший суммарный ток пучка используется в ускорителях с энергией 1 МэВ, таких как ЭЛВ-12 [9, 15] и Электрон-23 [16], мощность которых достигает 400–500 кВт. Расчетная производительность одного такого ускорителя ($E = 1$ МэВ, $M = 500$ кВт) при обработке речной воды с дозой $D = 0.5$ кГр может составить 5700 м³ в час. Но практически такая производительность недостижима из-за ограниченной производительности

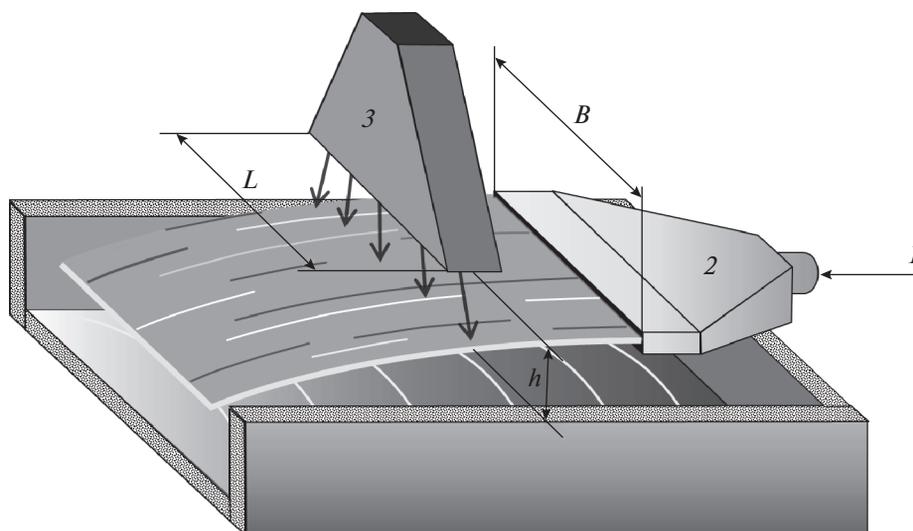


Рис. 2. Относительное положение ускорителя и широкой струи воды. Обозначения: 1 – подача воды, 2 – сопло, формирующее струю воды, 3 – пучковое окно ускорителя.

радиационно-химического реактора. Практическая скорость облучаемой струи не превышает 5 м/с. Более высокая скорость рискованна с технологической точки зрения из-за высокой вероятности нарушения сплошности струи, неравномерности облучения (несоответствие скорости струи и частоты сканирования пучка) и чрезмерного абразивного воздействия взвешенных примесей на водяное сопло. В случае $v = 5$ м/с, расход 5700 м^3 в час соответствует 34 м общей ширины струи. Однако равномерное облучение такой широкой струи одним пучком кажется невероятным. На практике длина пучкового окна L составляет до 2.4 м (например, в ускорителе “Электрон-23” [16]), и, следовательно, ширина зоны облучения не может превышать 2.4–2.5 м. Таким образом, струя шириной 34 м требует генерирования, по меньшей мере, 14 пучков в одном ускорителе или использования 14 отдельных ускорителей. Однако каждый ускоритель имеет весьма высокую стоимость.

Общая ширина струи воды B (м) может быть рассчитана по уравнению [6]:

$$B = 0.1 \times \frac{M f}{v D R}, \quad (1)$$

где M – мощность пучка (кВт), f – доля энергии излучения, поглощаемой облучаемой водой (в настоящей работе предполагается, что $f = 0.75$), D – доза (кГр), v – линейная скорость воды (м/с), R – пробег электронов (см). Уравнение (1) также учитывает энергию пучка E , поскольку пробег R зависит от E [17]. Результаты расчета по уравнению (1) для $E = 1$ МэВ показаны на рис. 3. В правой части рисунка отмечено количество пучковых окон, необходимое для извлечения соответствующей

общей мощности пучка. Можно видеть, что общая ширина B потока воды и, соответственно, количество требуемых пучковых окон уменьшается с увеличением дозы D , но даже при $D = 4$ кГр ускоритель должен иметь более одного пучкового окна.

ОБЛУЧАТЕЛИ С НЕСКОЛЬКИМИ УСКОРИТЕЛЬНЫМИ ТРУБКАМИ (МТК)

Конструкция ускорителей может быть различной (рис. 4). В частности, она может включать несколько ускоряющих трубок и, соответственно, несколько устройств для выпуска электронных пучков в атмосферу [8, 9]. Ниже компоновка ускорителя с несколькими ускоряющими трубками, будет упоминаться как МТК. Трубки запитываются от одного высоковольтного генератора (ВН) с помощью жесткого фидера. В качестве ВН обычно используют трехфазный трансформатор-выпрямитель с заземленным магнитным сердечником и параллельным питанием каскадов. Такой высоковольтный источник имеет КПД преобразования выше 90% и практически не имеет ограничений по мощности. Например, ускоритель ЭЛВ-12 с энергией 1 МэВ [15] принадлежит к типу МТК, поскольку он имеет 3 параллельные ускоряющие трубки и, соответственно, 3 пучковых окна. Общий поток излучения состоит из трех пучков по 150 кВт каждый. ЭЛВ-12 впервые был успешно использован в качестве облучателя на демонстрационной установке для очистки сточных вод на промышленном красильном комплексе в г. Тэгу, Республика Корея [12, 18].

Как правило, конструкция пучкового окна рассчитывается на плотность тока пучка не выше

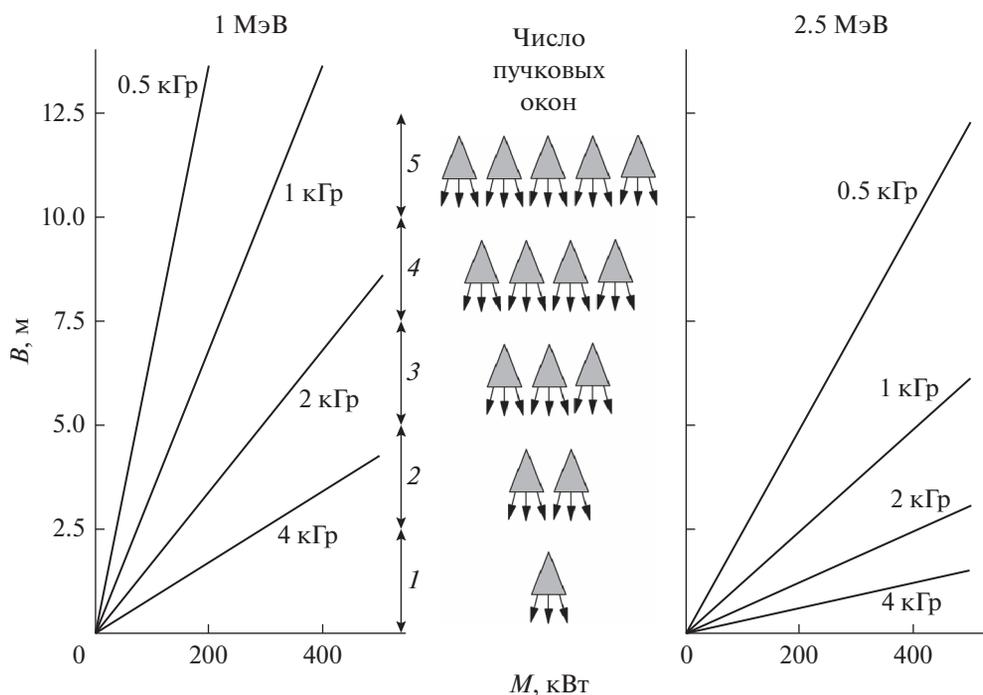


Рис. 3. Общая ширина B водяных струй в зависимости от мощности пучка M и дозы D при энергии электронов 1 и 2.5 МэВ и скорости воды 5 м/с. В центре показано требуемое количество пучковых окон (при $L = 2.5$ м).

100 мкА/см² во избежание перегрева и плавления фольги. Электронный пучок непрерывно сканируется в плоскости пучкового окна, чтобы обеспечить надлежащее охлаждение фольги (с использованием воздуха и/или жидкого хладагента). Пучковое окно может состоять из продольных секций, снабженных индивидуальными опорными рамами, что позволяет увеличить общую площадь фольги, общий ток пучка и срок службы окна. Соответственно, электронный пучок последовательно сканируется вдоль каждой секции. Например, каждое пучковое окно в ускорителе ЭЛВ-12 ($L = 1600$ мм) имеет две параллельные секции шириной по 75 мм. Благодаря этому ускоритель на установке в Тэгу [9, 15] обеспечивал возможность облучения двух встречных струй ($v = 2.5$ м/с) вместо одной струи ($v = 5$ м/с). В ускорителе “Электрон-23” одно пучковое окно ($L = 2400$ мм) состоит из четырех продольных секций шириной по 60 мм.

Несомненно, распределение мощности между несколькими ускорительными трубками, соответствует задаче создания мощных ускорителей. Однако очевидно, что несколько параллельных ускоряющих трубок обуславливают громоздкость, как ускорителя, так и под-пучкового оборудования. Каждая ускоряющая трубка должна быть согласована с отдельным реактором, что приводит к увеличению технологической площади. Кроме того, компоновка МТК приводит к сложности технического обслуживания ускорителей и сложности системы подачи воды на облучение.

ОБЛУЧАТЕЛИ С НЕСКОЛЬКИМИ ПУЧКОВЫМИ ОКНАМИ (МОК)

Конструкция ускорителя может также основываться на использовании нескольких пучковых окон с одной ускорительной трубкой (далее — многооконная компоновка, МОК). Такая компоновка может рассматриваться как более компактная альтернатива. Ускорители МОК также используются на практике, например, ускоритель “Электрон-10” (НИИЭФА, [19]), пучок которого распределяется между двумя окнами, а также ускоритель “Электрон-17” [20], где одна ускоряющая трубка дает электронный пучок для 4 пучковых окон.

Несколько пучковых окон с одной ускорительной трубкой могут обеспечить как компактность, так и высокую мощность ускорителя. Например, ускоритель МОК может иметь одну ускорительную трубку и 8 пучковых окон [6], рассчитанных на стандартную плотность тока. Разработчики считают, что создание такого ускорителя может встретить больше финансовых препятствий, чем технических. Сегодня есть примеры использования одной ускорительной трубки с током пучка 0.5 А (Электрон-23) и 0.8 А (Факел) [16, 21, 22]. МОК позволяет использовать более простое оборудование под пучком. Например, [6], вода может быть облучена в форме кольцевой вертикальной струи или горизонтальных струй, движущихся вдоль стенок бетонной цилиндрической камеры,

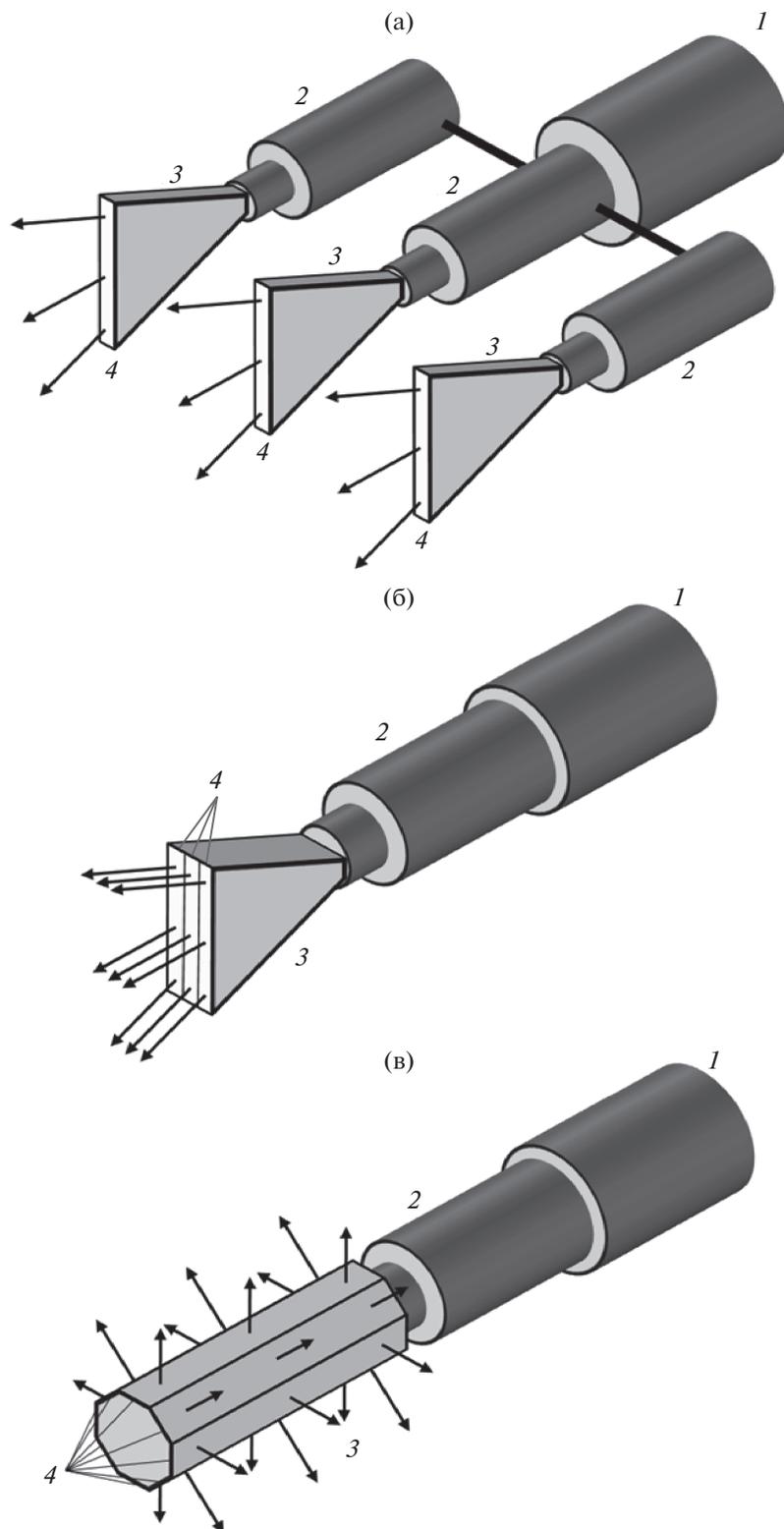


Рис. 4. Схемы компоновки ускорителя: с несколькими ускорительными трубками (а), с секционированным пучковым окном (б) и с мультиоконным выпускным устройством (в). Обозначения: 1 – высоковольтный генератор; 2 – ускорительные трубки; 3 – выпускные устройства; 4 – пучковые окна.

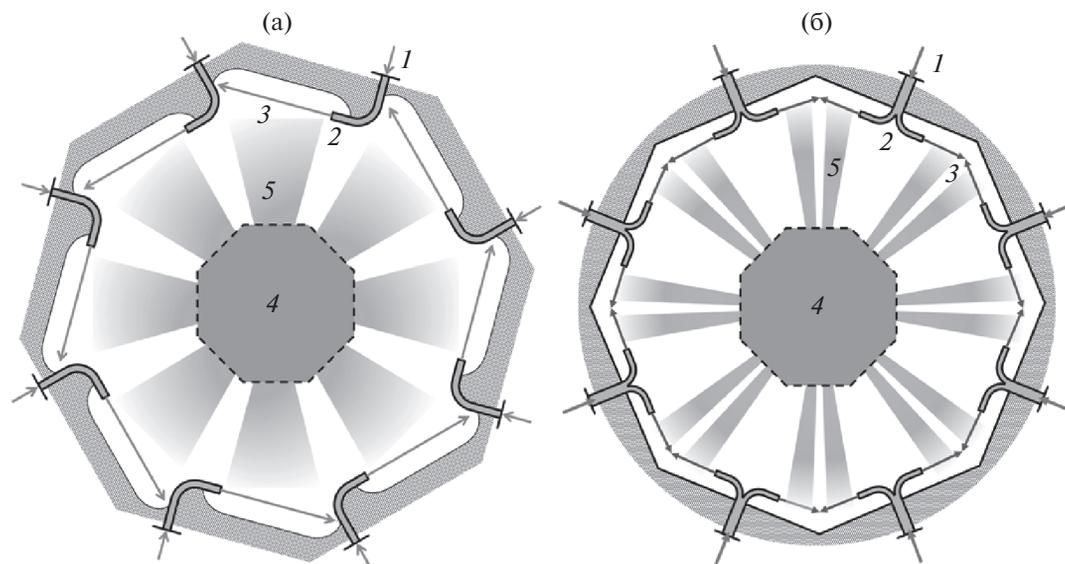


Рис. 5. Схемы реакционного сосуда для облучения 200 тысяч (а) и 400 тысяч (б) кубических метров воды в сутки в струйном режиме. Обозначения: 1 – подача воды; 2 – сопло, формирующее струю воды; 3 – мультиоконное выпускное устройство ускорителя; 4 – мультиоконное выпускное устройство ускорителя; 5 – электронный пучок.

окружающей многооконное выпускное устройство (рис. 5).

В зависимости от энергии электронов, окружность бетонной камеры может составлять 9.4–12.6 м. Гипотетически, в случае вертикального направления кольцевого потока воды вдоль цилиндрических стен, при токе пучка 100 мА в каждом окне ($100 \times 8 = 800$ мА), ускоритель МОК с $E = 1$ МэВ позволяет обрабатывать до 38 тысяч кубических метров в день. В свою очередь, при горизонтальном направлении струй (рис. 5), ускоритель МОК с энергией 5 МэВ может облучать до 200–400 тысяч кубометров в сутки [1, 6]. Ток пучка $I = 100$ мА в каждом окне подходит для относительно низких поглощенных доз – от 1.2 до 2.9 кГр. Однако доза может быть увеличена путем вышеупомянутого секционирования пучковых окон и, соответственно, увеличения тока пучка. Например, при использовании 4 продольных секций в каждом окне и токе пучка 50–75 мА в каждой секции, суммарный ток в каждом окне может достигать 200–300 мА. Такой ток соответствует большей мощности ускорителя M и, соответственно, большей поглощенной дозе D – от 3.7 до 8.8 кГр [6].

ЗАТРАТЫ

Несомненно, один мощный ускоритель МОК будет занимать гораздо меньшую площадь, чем один или несколько ускорителей МТК одинаковой общей мощности. В частности, экономия места может послужить стимулом для использования более дорогого ускорителя с более высокой

энергией (что является предпочтительным с точки зрения производительности и технологических преимуществ).

Экономические оценки обработки сточных вод электронным пучком обычно основаны на линейной зависимости стоимости ускорителя C от энергии пучка E . Линейная зависимость применяется уже много лет и, в частности, подходит для оценки стоимости МТК ускорителей. Однако линейная зависимость оправдана для серийных ускорителей малой мощности (до 150 кВт), а также для несерийных моделей мощных ускорителей. Но некоторые производители ускорителей используют зависимость $C \sim E^{1/2} M^{1/4}$. Очевидно, первые несколько экземпляров новой модели ускорителя стоят дорого, но при массовом производстве модель становится дешевле.

Несомненно, ускоритель становится более громоздким с увеличением энергии и мощности пучка. Удельный расход металла на изготовление однооконных ускорителей малой мощности, а также на изготовление ускорителей МТК является самым большим. В свою очередь, ускорители МОК, состоящие из меньшего количества частей, должны стоить меньше, чем МТК. В качестве верхнего предела стоимости серийных ускорителей МОК можно предложить зависимость $C = 185E^{0.75} M^{0.38}$, где C выражено в 1000 долл. США, E в МэВ, а M в кВт. Таким образом, с технологической точки зрения компоновка МОК представляется перспективным техническим решением, обеспечивающим увеличение компактности, экономичности и производительности

установок для электронно-лучевой очистки сточных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будущие масштабы внедрения электронно-лучевой очистки сточных вод и водоподготовки зависят, прежде всего, от прогресса в разработке мощных ускорителей электронов. Даже самая экологически-чистая обработка воды электронным пучком, которая, однако, требует нескольких десятков или сотен дорогих ускорителей, пугает потенциальных потребителей. В свою очередь, проекты, использующие для обработки нескольких миллионов кубических метров сточных вод в день не более 3–10 ускорителей, воспринимаются гораздо более благоприятно. Соответственно, в следующих проектах необходимо серьезно рассматривать как более высокую энергию пучка, так и многооконную компоновку ускорителей. Масштабы рынка очистки сточных вод и водоподготовки во много раз больше масштабов рынка радиационного модифицирования и стерилизации. Соответственно, рынок очистки сточных вод и водоподготовки может стать основным потребителем радиационного оборудования с практически неограниченными коммерческими возможностями.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы АААА-А16-116121410087-6 Российской академии наук при финансовой поддержке Международного Агентства по Атомной Энергии (IAEA Research Contract No: 23887). Авторы благодарны профессорам Н.К. Куksанову (ИЯФ СО РАН) и Н.Г. Толстуну (НИИЭФА) за полезное обсуждение и предыдущее сотрудничество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomarev A.V., Ershov B.G. // Environ. Sci. Technol. 2020. Т. 54. С. 5331. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00545>
2. Wojnárovits L., Takács E. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2017. Т. 311. С. 973.
3. Pikaev A.K. // Water Sci. Technol. 2001. Т. 44. С. 131.
4. Meeroff D.E., Bloetscher F., Shaha B. // Radiat. Phys. Chem. 2019. Т. 168. С. 108541. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108541>
5. Chmielewski A.G., Han B. // Top. Curr. Chem. 2016. Т. 374. С. 68.
6. Ponomarev A.V. // Radiat. Phys. Chem. 2020, Т. 172. С. 108812. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108812>
7. Pikaev A.K. // High Energy Chem. 2001. Т. 35. С. 367.
8. Berejka A.J., Cleland M.R. (Eds.). Industrial Radiation Processing with Electron Beams and X-rays. IAEA & IIA, Vienna. 2011.
9. Kuksanov N.K., Salimov R.A., Fadeev S.N., Nemytov P.I., Golubenko Y.I., Korgachin A.I., Lavruchin A.V., Semenov A.V., Cherepkov V.G., Kogut, D. A. // Electrotech. Electron. 2018. Т. 53. № 7–8. С. 165.
10. Cleland M.R., Fernald R.A., Maloof S.R. // Radiat. Phys. Chem. 1984. Т. 24. № 1. С. 179. [https://doi.org/10.1016/0146-5724\(84\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0146-5724(84)90015-3)
11. Auslender V.L., Makarov I.G., Ostreiko G.N., Panfilov A.D., Podobaev V.S., Romashko N.D., Tarnetski, V. V., Tiunov M.A., Tkachenko V.O. // Instruments Exp. Tech. 2009. Т. 52. С. 574. <https://doi.org/10.1134/S0020441209040198>
12. Han B., Kyu Kim J., Kim Y., Seung Choi J., Young Jeong K. // Radiat. Phys. Chem. 2012. Т. 81. № 9. С. 1475. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.01.030>
13. He S., Sun W., Wang J., Chen L., Zhang Y., Yu J. // Radiat. Phys. Chem. 2016. Т. 124. С. 203. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.11.033>
14. Kurucz C.N., Waite T.D., Otaño S.E., Cooper W.J., Nickelsen M.G. // Radiat. Phys. Chem. 2002. Т. 65. С. 367. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(02\)00337-7](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00337-7)
15. Kuksanov N.K., Golubenko Y.I., Nemytov P.I., Salimov R.A., Fadeev S.N., Korchagin A.I., Kogut D.A., Domarov E.V., Lavruhin A.V., Cherepkov V.G., Semenov V.A. // Electrotech. Electron. 2014. Т. 49. С. 168.
16. Tolstun N.G., Efremov A.V., Ivanov A.S., Kuzhlev A.N., Maznev V.P., Machecha A.I., Ovchinnikov V.P., Pavluhov D.E., Svinin M.P., Solnyshkov D.A. // 24th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2014. Obninsk, Russia, 2014. С. 327.
17. Woods R., Pikaev A. Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing. Wiley, N.Y. 1994.
18. Makarov I.E., Ponomarev A.V., Han B. Emerging Applications of Radiation Processing. IAEA-TECDOC-1386. IAEA, 2003. С. 138.
19. Tolstun N.G., Ivanov A.S., Ovchinnikov V.P., Svinin M.P. EPAC 2006, Edinburgh, Scotland. Edinburgh, Scotland. 2006. С. 2005.
20. Ivanov A., Ovchinnikov V., Svinin M., Tolstun N., Bogart S. // Vacuum. 2001. Т. 62. С. 225. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00111-7)
21. Bryazgin A.A., Kuksanov N.K., Salimov R.A. // Uspekhi Fiz. Nauk 2018. Т. 188. С. 672. <https://doi.org/10.3367/ufnr.2018.03.038344>
22. Domarov E.V., Vorobyov D.S., Golkovsky M.G., Golubenko Y.I., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavruchin A.V., Nemytov P.I., Salimov R.A., Semenov A. V., Sorokin A.V., Fadeev S.N., Chakin I.K., Cherepkov V.G. // Sib. J. Phys. 2019. Т. 14. С. 5. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20>