

ПЕРСПЕКТИВНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ ПОТУЖНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ З ВІКНОМ ВИВОДУ ПУЧКА З ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВОГО КОМПОЗИТА

В.С. Антіпов, Є.М. Бабич, В.А. Гурін, О.М. Єгоров, В.І. Карась, В.О. Кисельов,
О.Ф. Ковнік, В.В. Колосенко, Є.О. Корнілов*

*Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”,
Харків, Україна;*

**Інститут мікробіології та імунології ім. І.І. Мечникова, Харків, Україна
E-mail: kornilov@kipt.kharkov.ua*

Проведено аналіз використання промислових прискорювачів для радіаційних технологій, в першу чергу для глибокого очищення стічних вод. Показано, що перспективними є лінійні індукційні прискорювачі (ЛІП) з вікнами виведення з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ). Експериментально встановлено, що втрата енергії електронного пучка у ВВКМ в 2-3 рази менше, ніж у берилії. Висока міцність ВВКМ на стиснення дозволяє виготовляти вікна виведення великої площі. Експериментально показано, що через синергетичний ефект метод спільної обробки води електронним пучком та озоном у присутності іонів міді є перспективним для її глибокого очищення від бактерій, патогенних вірусів, лікарських засобів і хімічних сполук. Крім цього ВВКМ можна використовувати для виведення нейтронів і протонів, завдяки високій радіаційній стійкості до рентгенівського та нейтронного випромінювання.

ВСТУП

Серед актуальних задач сьогодення, поряд з такими як пошук нових альтернативних джерел енергії, є створення високопродуктивних екологічно чистих технологій в промисловості. Сучасні технології широко використовують електронні пучки, що випускаються в атмосферу.

Проведені в останній час дослідження показали високу ефективність використання пучків заряджених часток у цілому ряді технологічних процесів: модифікація полімерних матеріалів, поверхневе зміцнення металів, виробництво нанопорошків, стерилізація медичних матеріалів та інструментів, стерилізація та пастеризація харчових продуктів, дезінфекція сільськогосподарської продукції, очищення промислових газоподібних викидів, обеззараження природних та стічних вод. Цей список постійно поповнюється.

На цей час застосування радіаційних технологій активно розширюється в багатьох державах, таких як: США, Японія, Південна Корея, Китай та інших. Багато радіаційних процесів протікає при значних потужностях поглинаючої дози. Для вирішення екологічних проблем: очищення димів від окислів сірки і азоту на електричних та теплових станціях; діоксинів на фабриках по спалюванню сміття; очищення води; промислових стоків – необхідні прискорювачі електронів з великою середньою потужністю 100...200 кВт.

В останні роки з'явилась потреба в прискорювачах електронів для екологічних застосувань з потужністю випущеного електронного пучка близько 500 кВт [1]. Таким чином, для розвитку прискорювальних комплексів технологічного призначення розробка прискорювачів, що мають високу імпульсну та середню потужність, має безумовний інтерес.

1. ПРОМИСЛОВІ ПРИСКОРЮВАЧІ

На цей час більше 1300 прискорювачів з потужністю до 200 кВт та більше використовуються в промисловості та технологічних центрах всього світу.

За енергією та способом прискорення промислові прискорювачі електронів можна розділити на такі категорії: електронні лінійні високовольтні (ЕЛВ) (випрямного типу) з енергією 0,2...2,5 МеВ, потужністю від 20 до 400 кВт, коефіцієнтом корисної дії (ККД) більше 90 % [2]; імпульсні лінійні прискорювачі (ЛІП) (високочастотного типу) з енергією 0,7...5 МеВ, потужністю до 50 кВт, ККД 30 % [3]; динамітрони (прискорювачі на основі каскадних генераторів) з енергією до 5 МеВ, потужністю до 200 кВт та ККД 70...80 % [4]; лінійні індукційні прискорювачі (ЛІП) з енергією до 30 МеВ, потужністю до 500 кВт, ККД до 80 % [5,6].

Для того щоб цей процес став привабливим для промисловості, необхідна його економічна ефективність, для чого потрібно збільшити продуктивність та рентабельність прискорювачів. Оскільки енергія прискорювачів, які працюють у режимі генерації гальмівного випромінювання, і призначених для обробки продуктів харчування, рекомендаціями МАГАТЕ обмежена 5 МеВ, то єдиним способом підвищення продуктивності установки є збільшення потужності прискорювача.

У таблиці показана приблизна вартість прискорювача в залежності від середньої потужності пучка [7].

Потужність пучка, кВт	20	40	100	200	400
Повна вартість, 10 ⁶ \$	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0
Питома вартість, \$/Вт	30	20	10	7,5	5

В останній час розвивається технологія радіаційної обробки за допомогою імпульсних пучків електронів. Це пов'язано з тим, що використання коротких імпульсів дозволяє збільшити миттєву потужність випромінювання і отримати той же ефект при більш низькій загальній радіаційній дозі. Крім того, перехід до імпульсних прискорювачів, особливо наносекундного діапазону, дозволяє різко зменшити габарити схем формування високої напруги за рахунок збільшення електричної міцності ізоляції при імпульсній дії.

Аналіз показує, що для розробки радіаційних технологій, у тому числі і для знезараження води, перспективними є імпульсні ЛПП, які при високому темпі прискорення та частоті посилення можуть забезпечити середню потужність пучка у сотні кіловатт з енергією до 10 МеВ та струмом на рівні десятка кілоампер при ККД до 80%. При цьому вони найбільше відповідають споживним якостям промислових прискорювачів: відсутність елементів конструкцій, які знаходяться під напругою більше 100 кВ; відсутність потужних джерел НВЧ-випромінювання; простота, надійність та технологічність виготовлення і експлуатації прискорювача.

У зв'язку з вищевикладеним в ННЦ ХФП розробляється комплекс фізичного і технологічного призначення на основі модулів імпульсного лінійного індукційного прискорювача [8]. На Рис.1 приведено загальний вид двох модулів ЛПП.



Рис.1. Загальний вид лінійного індукційного прискорювача електронів

До складу обладнання радіаційно-технологічного комплексу, окрім прискорювача, входять: спеціально обладнане приміщення з радіаційним захистом; система транспортування продукції, що опромінюється; прилади технологічної дозиметрії та поточною радіаційного контролю.

2. НОВИЙ ТИП ВІКОН ВИВОДУ ПУЧКІВ З ПРИСКОРЮВАЧА В АТМОСФЕРУ

Вікно виведення прискорених часток є одним з основних елементів при використанні потужних джерел електронів та рентгенівського випромінювання для радіаційних технологій [2, 9]. Для досягнення високої продуктивності сильнотривового прискорювача необхідно мати випускні вікна з великою поверхнею. Розміри вікна та його форма обумовлені, в першу чергу, характеристиками матеріалу, допустимою робочою температурою і коефі-

цієнтом теплопередачі від вікна при його охолодженні. Найбільш поширеним на цей час є випуск електронів через тонку титанову або алюмінієву фольгу. Величина струму електронного пучка часто лімітується нагрівом фольги випускного вікна внаслідок іонізованих втрат у ній. Вікна, що використовуються, мають невеликі розміри, тому що при збільшенні площі вікна приходиться збільшувати товщину фольги, що призводить до зниження її прозорості та густини струму, який пропускається. На основі фольги без підтримуючої опори неможливо створити вікна виведення з великою поверхнею. Проте наявність ребер призводить до великої втрати струму пучка і, відповідно, зменшенню коефіцієнта корисної дії прискорювача на 30...40% [9].

У ННЦ ХФП розроблено матеріал та технологію виготовлення герметичного вікна для випуску потоку прискорених часток з вакуумного об'єму в зовнішнє робоче середовище з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ) без використання підтримуючих опор [10].

Матеріал для вікна створюється шляхом піролітичного осадження вуглецю (піровуглецю) з газової фази в об'єм заготовки з вуглецевої тканини, що забезпечує густину ВВКМ не менше 1,2 г/см³. Такий матеріал має високі міцнісні характеристики, особливо на стиснення. Проте через пористість вікна, виготовлене з нього, не має потрібної герметичності, щоб його можна було б використовувати для відокремлювання вакуумного об'єму прискорювача від зовнішнього середовища. Щоб для герметизації вікна не треба було використовувати металеву фольгу, пори в матеріалі перегордки закупорюють кремнієм при температурі його плавлення. Вікно, виготовлене з такого матеріалу, має всі переваги ВВКМ (висока механічна міцність, малі втрати енергії електронів із-за невеликої атомної ваги), а просочений ВВКМ кремній забезпечує вакуумне ущільнення та захист від окислення цього матеріалу.

Проведено експериментальні іспити випускного вікна плоскої форми, виготовленого з ВВКМ густиною 1,5 г/см³ (Рис.2). Пори в ньому з боку вакуумного об'єму прискорювача закупорені кремнієм. Таке вікно призначене для випуску пучка електронів з енергією 4 МеВ з вакуумного об'єму прискорювача в робоче середовище, яким є вода під тиском 1 кг/см². Враховуючи, що границя міцності матеріалу на вигин при такій густині складає 60 МПа, вікно, товщиною 2 мм мало діаметр 100 мм (див. Рис.2).

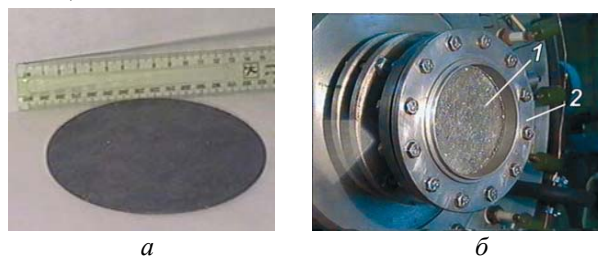


Рис.2. Вікно виводу пучка (а) та загальний вид пристрою виводу пучка (б):

- 1 – вікно з вуглець-вуглецевого матеріалу;
- 2 – фланець для кріплення вікна виводу

Для електронів з енергією 4 МеВ енергетичні втрати у розробленому вікні склали 150 кеВ/мм. При цьому ВВКМ має високу радіаційну стійкість до рентгенівського та нейтронного випромінювання (зберігає свої властивості при нейтронному флюенсі $2 \cdot 10^{22}$ нейтр./см²) [11].

Розроблена в ННЦ ХФТІ технологія дозволяє формувати півсфери ВВКМ діаметром більше 0,3 м, і товщиною ~ 3 мм. Вікна такого розміру при охолодженні водою забезпечать біологічну очистку води об'ємом $3,4 \cdot 10^4$ м³ за добу при дозі 20 кГр. На Рис.3 представлена схема обробки води електронним пучком.

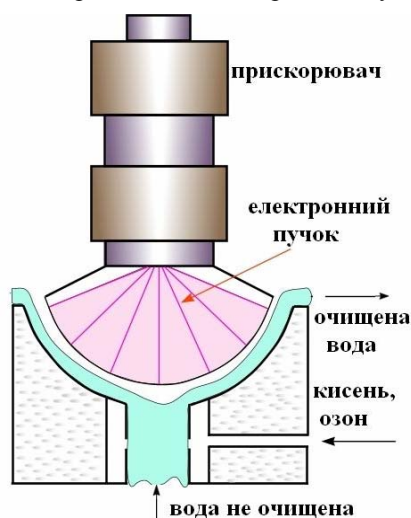


Рис.3. Схема очищення води електронним пучком

Важливо відзначити, що використання вуглецевих нанотрубок для виготовлення ВВКМ дозволить збільшити міцність вікон, а отже, зменшити його товщину та втрати енергії пучка в ньому. Слід відзначити, що введення кільцевого пучка в об'єм, обмежений тонкостінною трубкою з вуглець-вуглецевого матеріалу, коли зберігаються всі основні якості ВВКМ, відкриває великі можливості в створенні комплексів для радіаційних технологій. В даному випадку суттєво спрощується система опромінення пучком виробів – матеріалу, розміщеного в порожнині труби.

Вікно з ВВКМ можна використовувати для введення пучка протонів у реактор замість вольфрамового вікна, причому втрати енергії пучка в ньому у 8 разів менше, ніж у вольфрамовому, при тих же механічних характеристиках [12, 13].

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ПИТНОЇ ТА СТІЧНОЇ ВОДИ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

Методи дезинфекції води, що застосовуються на цей час: хлорування, озонування та ультрафіолетова обробка – мають ряд недоліків [14], основні з яких є:

- хлорування (хлор – шкідливий агресивний газ); при взаємодії хлору з органічними речовинами утворюються діоксини, з якими пов'язують захворювання на рак; відбувається засолювання вододіймів; малоефективне у воді з високим вмістом амонію та деяких інших речовин; не знищує гельмінти, спори та віруси;

- озонування: потребує значних енерговитрат; утворюються побічні продукти – броміди, альдегіди, кетони;

- УФ-випромінювання: пред'являються високі вимоги до прозорості води; потребується часта заміна ламп; утилізація ламп – серйозна екологічна проблема, тому що лампи містять пари ртуті; не ефективне у промислових масштабах.

Одним з методів обробки води з метою її дезинфекції та очистки є радіаційна обробка. До числа найбільш важливих переваг радіаційної технології в порівнянні з традиційними методами обробки води є повне відмовлення від реагентів (безреагентна технологія).

Перспективність використання електронного пучка для очистки води демонструється нашими експериментальними дослідженнями [15] на модельних зразках води та стічних водах, а також накопиченим досвідом роботи в ряді досліджень на водоочисних спорудах зарубіжних країн [16]. Привабливість очищення води електронним пучком полягає в тому, що він при проходженні у воді розбиває молекулу води і створює сильні окислювачі, гідратовані електрони e-, та H⁺aq, OH⁻aq, OH⁻, H₂, H₂O₂, які ефективно окислюють мікроорганізми, токсиканти та органічні сполуки.

Приведемо результати наших досліджень, виконаних з використанням електронного пучка з енергією 3...4 МеВ на модельних зразках: дистильована вода, засіяна мікроорганізмами з концентрацією 10⁹ колонієутворюючих одиниць (КУО) бактерій в мілілітрі, та стічних водах накопичувального басейну стоків Харкова до її очищення.

Встановлено виражений бактерицидний ефект радіаційного опромінення мікроорганізмів в модельних розчинах при опроміненні дозою 1...2 кГр. Для кожного тест-об'єкта визначено граничні дози поглинутого випромінювання (5...10 кГр), вище яких бактерицидна дія різко посилюється і стає повною. При цьому забезпечується стабільність санітарно-бактеріологічних показників зразків води протягом 6 діб. Показано, що порогом чутливості санітарно-показової мікрофлори до дії електронного пучка є поглинаючі дози від 2,4 до 3,6 кГр. Бактерицидний ефект спостерігався при енергетичному навантаженні модельних зразків: ентеробактерій – в межах 3,8 кГр, стафілококу – 4,5 кГр, ентерококу – 4,8 кГр, клібсїєли – 10 кГр.

Відомо, що антибіотики не повністю засвоюються людьми і попадають в стічні води. Перевищення допустимих норм в ній може привести до враження імунної системи людей. Тому було проведено дослідження руйнування антибіотиків електронним пучком.

Показано, що знешкодження антибіотиків (пеніцилін, стрептоміцин, тетрациклін) у концентраціях 0,31...5,0 одиниць активності (ОА) (за міжнародну одиницю активності приймають специфічну активність, що міститься в 1 мг пеніциліну) спостерігається при поглинаючій дозі електронного пучка 7,2 кГр, а при більш високих концентраціях препаратів (до 100 ОА) руйнування цих хімічних сполук досягалося при дозах 15...30 кГр.

Дуже шкідливими забрудниками води є нафтопродукти. Досліджено руйнування нафтопродуктів у розчинах з концентрацією 22 мг/дм³. При дозі випромінювання 22,5 кГр вміст нафтопродуктів знижувався на 78 %. У розчинах з концентрацією нафтопродуктів 118 та 164 мг/дм³ ефективність зниження концентрації складала до 40 % при дозі випромінювання 60 кГр. Обробка електронним пучком модельних зразків води, що містять значно нижчі концентрації – 5 мг/дм³, дозволила зменшити вміст нафтопродуктів до 60 % при дозі випромінювання 16 кГр.

При обробці електронним пучком стічної води після механічного очищення на Безлюдівській станції аерації м. Харкова було виявлено зниження концентрації органічних сполук на 34,3 % при дозі випромінювання 20 кГр і зниження на 20,4 % при дозі випромінювання 4 кГр.

Аналіз одержаних даних показав, що при зовсім невеликій дозі випромінювання відбувається зниження концентрації органічних речовин у механічно очищених стічних водах на 20 %, що забезпечить якість очищення води у відповідності з нормативними вимогами, які існують для скиду їх у водні об'єкти. Концентрація заліза загального знижується на 60 % при невеликих дозах випромінювання – 4 кГр.

Результати досліджень на модельних зразках розчинів показали, що використання релятивістських електронних пучків також перспективно для очистки води від нітрит-іонів, нітрат-іонів, амонійних іонів, фосфат-іонів, глюкози, очищеного газу.

Із неорганічних сполук найбільш легко розщеплялися під впливом електронного пучка нітриту. У дослідгах взяті модельні розчини з концентрацією нітритів, яка в 6 разів перевищує гранично допустимі показники для питної води. Біля 50,0 % цієї сполуки було знешкоджено вже при опроміненні з дозою 4,8 кГр. Збільшення інтенсивності дії пучка до 12 кГр дозволило знизити вміст нітритів до безпечної для здоров'я людини концентрації.

Встановлено, що обробка проб води в режимах опромінення 0,8...3,2 кГр не приводить до утворення мутацій серед представників санітарно-показової мікрофлори.

Одною з можливих альтернатив хімічної дезинфекції води є одночасна обробка електронним пучком і озоном. При цьому клітинні мембрани мікроорганізмів руйнуються із-за синергетичного ефекту, що робить дезинфекцію води більш ефективною. Проведені нами дослідження показали, що метод сумісної обробки електронним пучком і озоном є дуже перспективним для очистки води від шкідливих бактерій, патогенних вірусів, лікарських засобів та хімічних сполук. Показано, що оптимальні режими знезараження води залежать від ступеня бактеріального та хімічного забруднення, а також від температури води та її рН.

Запропоновано також нову методику знезараження води електронним пучком у присутності іонів міді [17]) У присутності іонів міді антимікробна дія пучка зростає в декілька разів.

ПІДСУМКИ

Показано, що прискорювальний комплекс на основі технологічних модулів сильнострумowego лінійного індукційного прискорювача електронів та вікон виводу з ВВКМ є оптимальним за вартістю та експлуатацією для радіаційних технологій, в першу чергу, для глибокого очищення стічних вод.

Розробки вікон виведення електронів, нейтронів і протонів з ВВКМ дозволять розширити використання радіаційних технологій в екології, медицині, промисловості, атомній енергетиці, а також лягти в основу створення комплексу для реалізації інерціального термоядерного синтезу на важких іонах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. S.N. Fadeev, Yu.I. Golubenko, N.K. Kuksanov, P.I. Nemytov, et al. Accelerator ELV-12 and its applications in environment protection technologies // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. «Nucl. Phys. Inv.»*. 2004, №1, p.178-180.
2. Р.А. Салимов. Мощные ускорители электронов для промышленных применений // *УФН*. 2000, т.170, №2, с.197-201.
3. V.L. Auslender, et al. Compact ILU-type electron accelerators as a base for industrial 4-sided irradiation systems for cable and tubes // *Radiation Physics and Chemistry*. 1999, v.54, p.609-618.
4. М.П. Свиньин. *Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей электронов для радиационных технологий*. М.: «Энергоатомиздат», 1989.
5. Ю.П. Вахрушин, А.И. Анацкий. *Линейные индукционные ускорители*. М.: «Атомиздат», 1978, с.246.
6. D.L. Goodman, et al. High Energy Linear Induction Accelerators for Material Processing Applications // *Proc. of the Radiation Tech. Int'l. Conf., Boston, MA*, 1992.
7. *International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators*, Vienna, Austria 4-8 May, 2009.
8. Пат. України №64208. 15.06.2005. Линейный индукционный ускоритель / А.Г. Гури́н, А.С. Алдакимов, Р.С. Ложкин, В.Я. Гладченко, Е.А. Корнилов.
9. Е.А. Абрамян. *Промышленные ускорители электронов*. М.: «Энергоатомиздат», 1986, 249 с.
10. Пат. України №88683. 10.11.2009. Герметичное окно для выпуска потока ускоренных частиц из вакуумного объема во внешнюю рабочую среду / В.А. Гури́н, В.В. Колосенко, О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, А.М. Егоров, С.Ю. Саенко, О.В. Бирюков.
11. В.А. Гури́н, В.Ф. Зеленський // *Питання атомної науки і техніки*. 1999, в.4(76), с.13-20.
12. C. Rubbia, J.A. Rubio, F. Carminati, et al. // *CERN / AT / 95-44(ET)*. 1995.
13. O.F. Kovpik, E.O. Kornilov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Kolosenko, O.V. Birukov, V.S. Antipov, V.A. Kiselev // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. «Nucl. Phys. Inv.»*. 2004, №1, p.77-79.

14. А.В. Егоркин, А.В. Зыкин. Разработка технологии электронной дезинфекции питьевой воды и сточных вод // «АТОМЭКО 2007», с.13-16.
15. V.S. Antipov, E.M. Babych, I.V. Berezhna, et al. // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. «Nucl. Phys. Inv.»*. 2004, №2, p.189-191.
16. M. Samy. Hanna. Examples of radiation wastewater treatment Implemented in various countries // *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008, Alexandria, Egypt*.
17. Пат. України №26575. 25.09.2007. Спосіб знезараження води / Т.В. Хірна, Є.М. Бабич, Н.І. Скляр, В.С. Антіпов, Н.С. Горбань, В.О. Кисельов, С.Л. Крестецька, Н.Ю. Ревякіна.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

PROMISING SYSTEM FOR RADIATION TECHNOLOGIES BASED ON HIGH-POWER INDUCTION ACCELERATOR OF ELECTRONS WITH WINDOW BEAM EXTRACTION FROM THE CARBON-CARBON COMPOSITES

V.S. Antipov, E.M. Babych, V.A. Gurin, A.M. Yegorov, V.I. Karas', V.A. Kiselev, O.F. Kovpik, V.V. Kolosenko, E.O. Kornilov

The analysis of the possibility of using industrial accelerators for radiation technologies, especially for deep cleaning of waste water is presented. It is shown that linear perspective are induction accelerators (LIA) with windows output of carbon-carbon composite material (CCCM). It is established by experimentally that the loss of energy of the electron beam in CCCM 2.3 times less than in the beryllium. High strength in compression CCCM can produce output windows of large area. It is shown that due to the synergistic effect of joint water treatment method for electron beam and ozone in the presence of copper ions is promising for its deep cleaning of bacteria, pathogenic viruses, drugs and chemicals. In addition CCCM can be used to display the neutrons and protons, due to its high radiation resistance of the X-ray and neutron radiation.

ПЕРСПЕКТИВНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВЕ МОЩНОГО ІНДУКЦІЙНОГО УСКОРІТЕЛЯ ЕЛЕКТРОНІВ С ОКНОМ ВИВОДА ПУЧКА ІЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТА

В.С. Антипов, Е.М. Бабич, В.А. Гурин, А.М. Егоров, В.И. Карась, В.А. Киселёв, О.Ф. Ковпик, В.В. Колосенко, Е.А. Корнилов

Проведен анализ использования промышленных ускорителей для радиационных технологий, в первую очередь для глубокой очистки сточных вод. Показано, что перспективными являются линейные индукционные ускорители (ЛИУ) с окнами вывода из уголь-угольного композиционного материала (УУКМ). Экспериментально установлено, что потеря энергии электронного пучка в УУКМ в 2,3 раза меньше, чем в бериллии. Высокая прочность УУКМ на сжатие позволяет изготавливать окна вывода большой площади. Экспериментально показано, что из-за синергетического эффекта метод совместной обработки воды электронным пучком и озоном в присутствии ионов меди перспективен для ее глубокой очистки от бактерий, патогенных вирусов, лекарственных средств и химических соединений. Кроме этого УУКМ можно использовать для вывода нейтронов и протонов, благодаря высокой радиационной стойкости к рентгеновскому и нейтронному излучению.