

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров Е. К. Экологический кризис и социальный прогресс. Л., Гидрометеиздат, 1977.
2. Сивинцев Ю. В. Ядерная энергетика и экология. М., «Знание», 1976.
3. Vohra K. In: Proc. IV Intern. Congr. IRPA. Paris, 1977, v. 1, p. 181.
4. Сивинцев Ю. В., Тверовский Е. Н. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 4, с. 263.
5. Hull A. «Nucl. Safety», 1974, v. 12, N 3, p. 185.
6. Martin J. e.a. In: Environmental Aspects of Nuclear Powes Station. Vienna, IAEA, 1971, p. 325.
7. Jaworowski Z. e.a. In: Environmental Surveillance Around Nuclear Installations. Vienna, IAEA, 1974, v. 1, p. 403.
8. Lave L. In: Proc. Conf. Energy and Environment: a Risk-benefit Approach. Birmingham, 1975, p. 63.
9. Ilyin L. A., Knizhnikov V. A., Barkhudarov R. M. [3], p. 189.
10. Радиационная защита. Публикация — рекомендаций МКРЗ. Пер. с англ. Под ред. А. А. Моисеева. М., Атомиздат, 1978.
11. Алексахин Р. М., Болтнева Л. И., Назаров И. М. «Лесоведение», 1972, № 1, с. 35.
12. Рябов Г. Г., Пристер Б. С., Кальченко В. А. «Радиобиология», 1971, № 16, с. 84.
13. Гусев Д. И. и др. В кн.: Проблемы радиозоологии водоемов — охладителей атомных электростанций. Свердловск, изд. УНЦ АН СССР, 1978, с. 8.
14. Нормы радиационной безопасности НРБ-76. М., Атомиздат, 1978.
15. Радиационный канцерогенез у человека. Доклад НКДАР ООН А/АС. 82/ 346, 1977.
16. Книжников В. А. «Гигиена и санитария», 1975, № 3, с. 96.
17. Thomas H. «Science», 1978, v. 202, N 4363, p. 37.
18. Кузин А. М. «Радиобиология», 1978, т. 18, № 3, с. 395.
19. Воробьев Е. И. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 374.

Поступила в Редакцию 15.05.79

УДК 621.384.64+621.384.658

Ускорители для промышленности и медицины (современное состояние и перспективы)*

ГЛУХИХ В. А.

Последние годы отмечены дальнейшим значительным расширением использования ускорителей заряженных частиц в радиационной технологии, дефектоскопии, активационном анализе и медицине, усовершенствованием технико-экономических и эксплуатационных показателей промышленных ускорителей и освоением новых направлений их применения. В настоящее время ежегодный объем продукции радиационных установок, эксплуатируемых за рубежом, превышает 1 млрд. долл. [1], причем более 9/10 его приходится на установки, в которых используются ускорители. При этом на промышленных предприятиях США установлено около 230 ускорителей, Японии — 35 [2], Советского Союза — более 40. Рост их использования

может быть охарактеризован изменением суммарной установленной мощности [2, 3], которая за последние 3—4 года удвоилась (рис. 1).

По-прежнему наиболее распространенными промышленными радиационными процессами являются обработка ускоренными электронами различных полимерных материалов, изоляции проводов и кабелей, пленок, вулканизация каучуков, отверждение лаков и красок, прививочная полимеризация и стерилизация [4]. Однако несмотря на ежегодное увеличение на ~20% выпуск изделий и материалов, подвергаемых радиационной обработке, все еще составляет малую долю объема производства соответствующих отраслей промышленности. Это наряду с малым сроком окупаемости радиационной техники свидетельствует о необходимости ее широкого внедрения. В связи с повышением стоимости энергии за последние несколько лет все большее значение приобретает также экономичность радиационной обработки материалов по сравнению с обработкой традиционными методами.

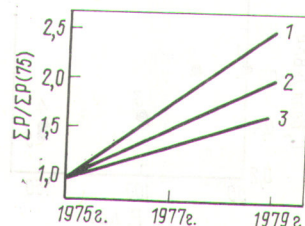
В Советском Союзе достигнуты значительные успехи в разработке и внедрении установок с ускорителями электронов, предназначенных для радиационной модификации проводов и кабелей с

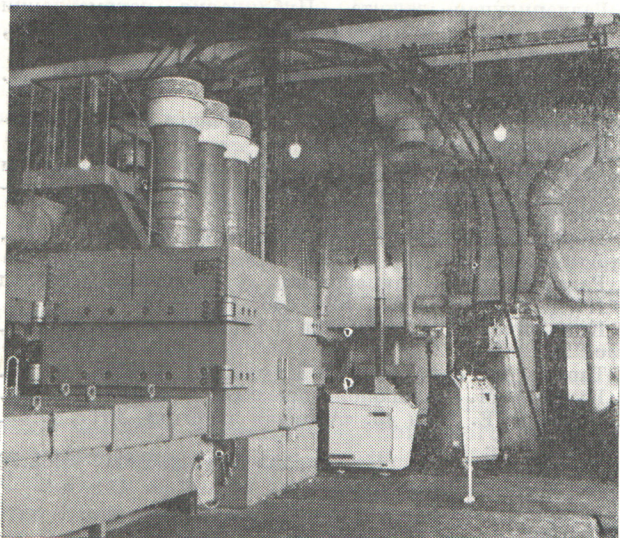
* Журнальный [вариант доклада на III Всесоюзном совещании по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Ленинград, июнь 1979 г.

В совещании участвовали свыше 300 человек от более чем 100 организаций Советского Союза и 40 зарубежных гостей из 9 стран. Работало шесть секций: радиационно-технологические процессы с применением ускорителей, ускорители для народного хозяйства, применение ускорителей в медицине, дефектоскопия, активационный анализ, формирование и контроль параметров выходящего пучка. На трех пленарных и пятнадцать секционных заседаниях было обсуждено около 200 докладов.

Совещание показало, что радиационная технология с использованием ускорителей вышла на новый качественный уровень. Если на двух предыдущих совещаниях в основном были представлены проекты ускорителей, то на данном, третьем, совещании преобладали доклады об опыте эксплуатации радиационно-технологических ускорительных установок, их конкретных параметрах и технико-экономических показателях. Эта тенденция нашла отражение в пленарном докладе председателя оргкомитета конференции директора НИИЭФА В. А. Глухих, предлагаемом вниманию читателей.

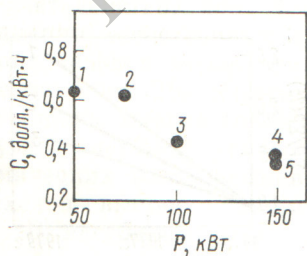
Рис. 1. Изменение мощности ускорителей электронов, установленных на промышленных предприятиях Советского Союза (1), США (2) и Японии (3)





Р и с. 2. Ускоритель электронов «Аврора II» с индивидуальной защитой

полиэтиленовой изоляцией [5], производства термоусаживающихся изделий [6], отверждения лакокрасочных покрытий [7, 8], радиационной обработки тканей и некоторых других видов изделий и материалов. Разрабатываются новые радиационные процессы, среди которых особый интерес представляет использование электронных ускорителей для защиты окружающей среды. Одним из перспективных направлений в этой области является радиационная очистка сточных вод, позволяющая отказаться от традиционного способа хлорирования [9]. Предварительные экономические оценки обоих способов [10] дают сопоставимые результаты, однако важно, что при радиационном способе исключается нежелательное воздействие большого количества хлора на природные условия в прилегающей местности. Но для очистки сточных вод крупного города таким способом потребуются ускорители, суммарная мощность пучков которых составляет несколько десятков мегаватт. Возможно также применение мощных электронных ускорителей для очистки газообразных отходов предприятий тяжелой промышленности и ТЭС от содержащихся в них окислов серы и азота. Полученные на опытной установке результаты [11] позволяют сделать вывод, что в этом случае необходимая

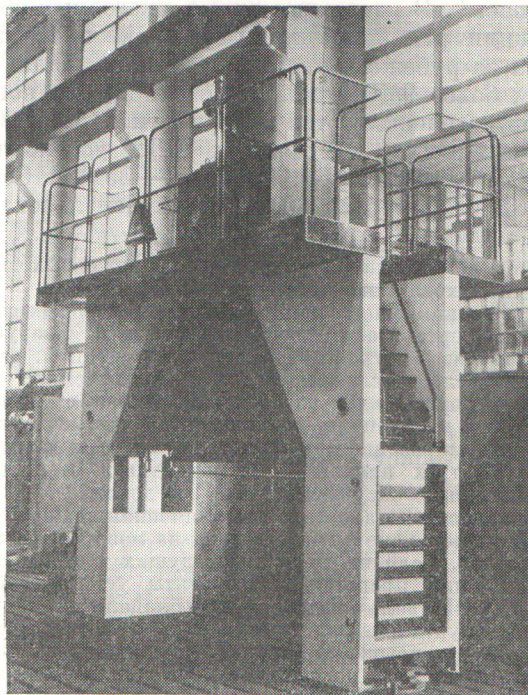


Р и с. 3. Зависимость стоимости обработки продукции для ускорителей фирмы RDI от мощности при энергии, МэВ: 1 — 0,5; 2 — 1; 3, 4 — 3; 5 — 1,5

мощность электронного пучка для станции мощностью 100 МВт составит около 4 МВт, и стоимость сооружения такой установки будет сопоставима со стоимостью очистных сооружений обычного типа [10].

В большинстве современных промышленных радиационных установок используются высоковольтные ускорители энергией 0,15—3 МэВ, что позволяет обрабатывать материалы и изделия толщиной до 1,2 см. При энергии до 0,7 МэВ большое применение нашли ускорители с индивидуальной защитой [7, 12] и с протяженным катодом [13], устанавливаемые в обычных производственных помещениях вместе с другим технологическим оборудованием радиационных установок (рис. 2). Мощность наиболее крупных из них, выпускаемых серийно, возросла до 150 кВт, одновременно существенно повышена их надежность. В результате значительно уменьшилась стоимость обработки материалов электронным пучком (рис. 3) и созданы предпосылки для расширения внедрения радиационной техники [14]. Были разработаны новые типы отечественных ускорителей (рис. 4) с пучком мощностью до 50 кВт [15, 16].

Очевидно, основным направлением развития ускорителей, используемых в промышленных радиационных процессах, в ближайшие годы следует считать дальнейшее увеличение их мощности и надежности. Уже сейчас представляется вполне реальным создание установок мощностью в стационарном режиме 1 МВт и более [14, 17], хотя



Р и с. 4. Высоковольтный ускоритель электронов «Аврора III»

для этого потребуется решение сложных научных и инженерных вопросов. Однако целесообразность проведения таких разработок определяется в первую очередь экономическими показателями соответствующих энергоемких радиационных процессов [10, 18] по сравнению с традиционными способами производства того или иного продукта. В то же время во многих случаях уже достигнутая мощность электронного пучка 50—150 кВт представляется достаточной вследствие ограниченной производительности других звеньев технологического процесса. Поэтому важным направлением усовершенствования промышленных ускорителей является также улучшение технико-экономических показателей за счет оптимизации конструктивных и схемных решений, снижение материалоемкости, повышение надежности и автоматизация управления.

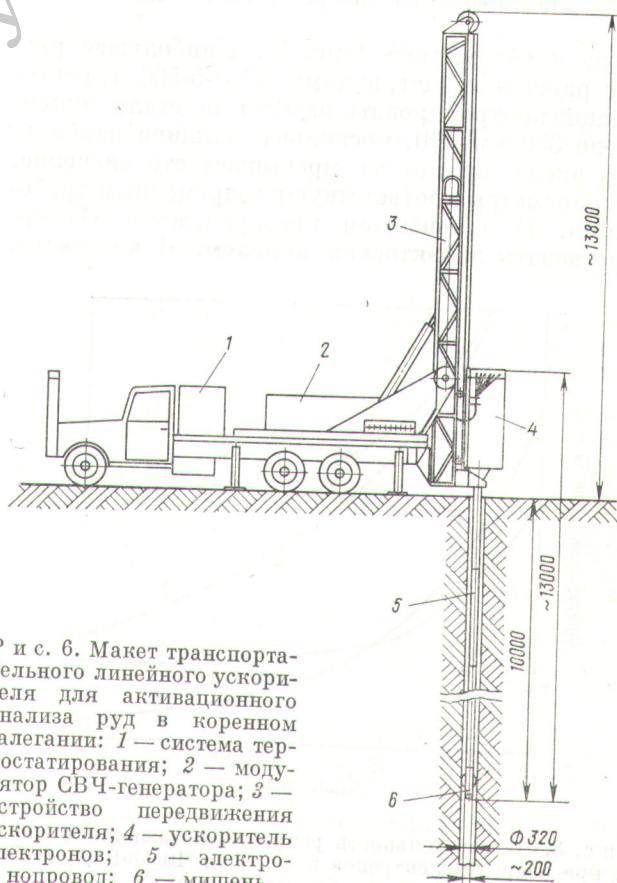
Заслуживает внимания внедрение непосредственно на промышленных предприятиях активационного анализа. Одним из эффективных является анализ содержания фтора в кормовых фосфатах в химической промышленности с применением нейтронного генератора НГ-150 [19]. Наряду с нейтронно-активационным получил развитие анализ с использованием фотоядерных реакций. Высокую избирательность, экспрессность и простоту реализации, свойственные методу, можно реализовать только при достаточно интенсивном потоке тормозного излучения вследствие относительно малого сечения взаимодействия излучения с веществом. Такие потоки создают линейные волноводные ускорители [20]. С использованием разработанных в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова ЛУЭ-15 А и ЛУЭ-8-5 А создана лаборатория экспрессного анализа руд на золото и сопутствующие элементы на горно-перерабатывающем комбинате [21] (рис. 5). Ускорители стационарные, отобранные для анализа рудные пробы доставляют в лабораторию. Но при этом сохранены такие трудоемкие операции, как пробоотбор, проборазделка и пробоупаковка. Поэтому заслуживает внимание анализ руд в естественном залегании, при котором можно не только устранить перечисленные операции, но и повысить его чувствительность и экспрессность. Возможный вариант такого ускорителя показан на рис. 6. Ускоритель жестко связан с электропроводом и мишенным устройством, изменение глубины погружения мишени в скважину достигается изменением высоты подъема относительно поверхности земли. Оборудование размещается на двух-трех автомашинах. Возможен вариант выполнения ускорителя, погружаемого в скважину. Однако его разработке должно предшествовать создание специального малогабаритного СВЧ-генератора.

Возрос интерес к ускорителям-дефектоскопам в связи с развитием в стране атомного энергомашиностроения. Так же, как и за рубежом, широ-

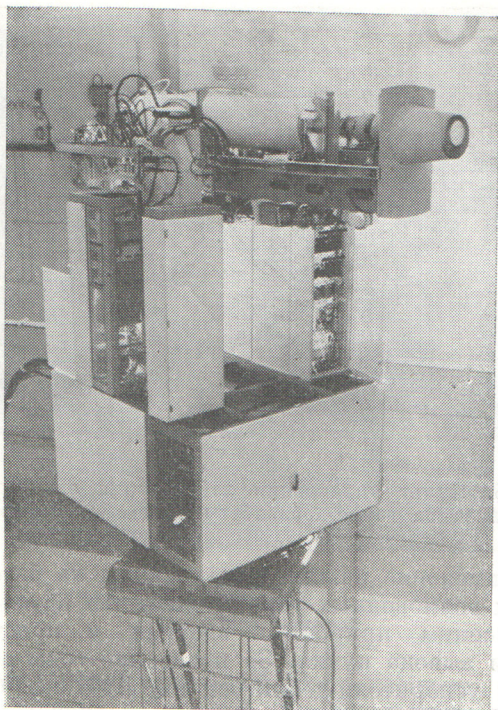


Р и с. 5. Пульта управления лаборатории экспрессного анализа на горно-перерабатывающем комбинате

кое применение нашли дефектоскопы на базе линейных волноводных ускорителей, что обусловлено высоким приростом энергии и простотой ввода и вывода пучка. За последние годы разработаны ускорители-дефектоскопы ЛУЭ-5-500 Д и ЛУЭ-15-15000 Д [22] и изготовлена их первая партия для Производственного объединения «Ижорский

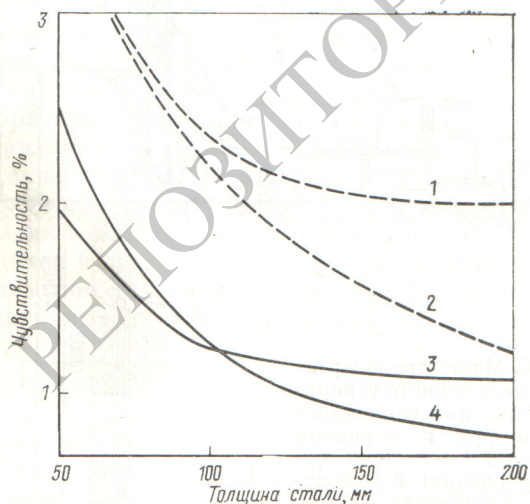


Р и с. 6. Макет транспортного линейного ускорителя для активационного анализа руд в коренном залегании: 1 — система термостатирования; 2 — модулятор СВЧ-генератора; 3 — устройство передвижения ускорителя; 4 — ускоритель электронов; 5 — электропровод; 6 — мишень



Р и с. 7. Ускоритель-дефектоскоп ЛУЭ-15-15000 Д в процессе сборки в камере просвечивания

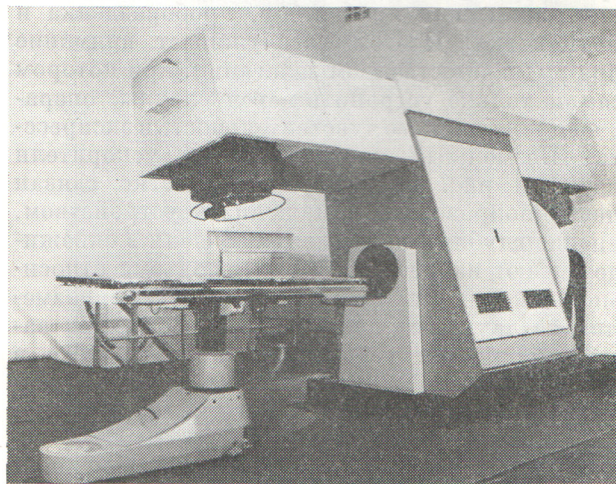
завод» и «Атоммаша» (рис. 7). Наибольшее распространение найдет, видимо, ЛУЭ-5-500 Д, позволяющий контролировать изделия из стали толщиной до 350 мм [23], поскольку толщина наибольшего числа изделий не превышает это значение. Его параметры соответствуют современным требованиям. В дальнейшем предполагается усовершенствовать дефектоскоп в целом. В частности,



Р и с. 8. Чувствительность рентгенотелевизионного метода при энергии электронов 5 (1, 3) и 10 МэВ (2, 4) без блока (1, 2) и с блоком памяти (3, 4)

эффективность некоторых операций контроля изделий атомного энергомашиностроения можно увеличить за счет применения панорамного просвечивания. Следует отметить, что возможности разработанных ускорителей-дефектоскопов не полностью реализуются, результаты просвечивания пока фиксируют на рентгеновской пленке, а ее установка и обработка занимают до половины общего времени контроля. Регистрацию и документирование результатов контроля совершенствуют в нескольких направлениях. Обнадеживающие результаты получены при использовании рентгенотелевизионной установки с блоком памяти. Достигнутая в экспериментах чувствительность (рис. 8) отвечает требованиям контроля изделий атомного энергомашиностроения [24].

Широкое распространение получили ускорители электронов, главным образом линейные волноводные, в медицине для лучевой терапии. По данным [25], в мире в 1978 г. насчитывалось до 600 таких ускорителей, и число их ежегодно увеличивается. В Советском Союзе их использование для лучевой терапии еще не стало столь масштабным. Пока используется около десяти ускорителей. Завершены исследования действующего макета ЛУЭ-15 М (рис. 9), в котором электроны можно ускорять до 20 МэВ [26]. На базе его разработан головной образец ускорителя для лучевой терапии с программным управлением ЛУЭ-15 МЭ [27]. В нем установлена совмещенная радиационная головка, что позволяет облучать как фотонами, так и ускоренными электронами. По параметрам он отвечает требованиям Международной электротехнической комиссии. С помощью такого ускорителя можно лечить более 50% видов онкологических заболеваний. Ускорителями этой модели будут оснащаться онкологические клиники нашей страны и стран — членов СЭВ. Начата разработка медицинского ускорителя на энергию уско-



Р и с. 9. Действующий макет ускорителя ЛУЭ-15 М

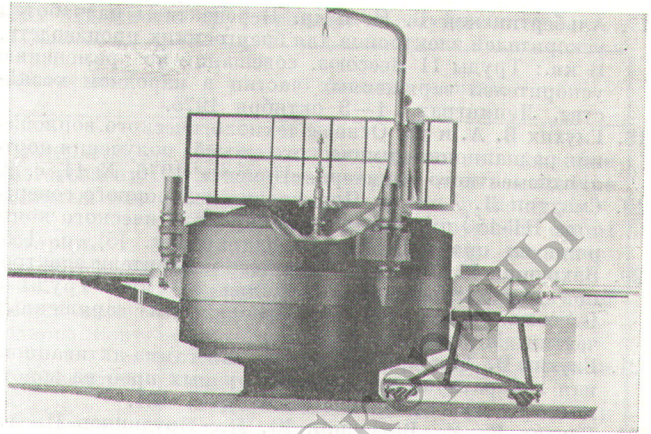
ренных электронов до 40 МэВ для онкологических научных центров.

Использование в лучевой терапии протонных пучков известно. По опубликованным данным, такое лечение в мире прошли более 2500 пациентов. Облучаемые локализации сейчас достаточно велики и постоянно расширяются. В Советском Союзе медико-биологические исследования и клинические работы на протонных пучках проводят в ОИЯИ, ИТЭФе и ЛИЯФе, но на ускорителях, предназначенных для физических экспериментов и лишь приспособленных для медицинских целей. НИИЭФА совместно с ИТЭФом, Онкологическим научным центром АМН СССР и другими организациями приступил к разработке многокабинного комплекса с использованием протонного синхротрона с жесткой фокусировкой на энергию до 220 МэВ и интенсивность пучка до 10^{12} протон/с. Комплекс предназначен для клинического использования (100 лучевых сеансов в день); диагностических целей (протонная радиография); физико-технических и медико-биологических исследований, направленных на расширение использования протонного пучка в медицине и биологии, а также производства радионуклидов для диагностических целей. В комплексе восемь каналов внешнего пучка с вводом в пять процедурных помещений.

Особенность ускорителей медицинского назначения состоит в том, что такие параметры излучения, как размер поля, мощность дозы, направление, должны меняться в процессе сеанса облучения по заданной врачом программе. Это приводит к необходимости разработки устройств, с помощью которых можно дистанционно менять параметры излучения и программу управляющей ЭВМ. Ускоритель должен быть укомплектован специальным столом для больного с нужным числом степеней свободы, чтобы изменять положение больного в процессе облучения. Таким образом, современный ускоритель медицинского назначения — сложное, насыщенное электроникой устройство.

Еще одним перспективным направлением применения ускорителей заряженных частиц в медицине является производство короткоживущих изотопов для диагностики заболеваний. В НИИЭФА им. Д. В. Ефремова для этих целей разрабатывается специальный циклотрон (рис. 10) [28, 29]. Для обеспечения высокой производительности ток пучка ускоренных до энергии 25 МэВ протонов должен достигать 1,5 мА на внутренней и 0,2 мА на внешней мишени.

Приведенные на конференции материалы свидетельствуют о дальнейшем количественном и качественном расширении использования ускорителей заряженных частиц в разнообразных областях деятельности, о всевозрастающем их воздействии на ускорение научно-технического процесса, повышение производительности труда и улучшение качества выпускаемой продукции.



Р и с. 10. Внешний вид циклотрона для производства короткоживущих изотопов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silverman J. Current Status of Radiation Processing. 2nd Int. Meet. on Radiat. Proces. Miami. Oct. 22—26, 1978.
2. Machi S. Industrial Application of Radiation Processing in Japan. Ibid.
3. «Business Week», 11 July 1977.
4. Morganstern K. Radiation Processing with Electron Beam Accelerators (Present and Future Application). Доклад на Всемирном электротехническом конгрессе. М., июнь 1977.
5. Финкель Э. Э., Мещанов Г. И. Современное состояние и перспективы расширения использования ускорителей электронов в производстве проводов и кабелей. Тезисы III Всесоюз. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, с. 55. Ленинград, 26—28 июля 1979.
6. Актабаева Л. С. и др. Использование ускорителей электронов при производстве термоусаживающихся манжет. Там же, с. 20.
7. Альбертинский Б. И. и др. Опыт эксплуатации РХУ с ускорителями типа «Аврора» для отверждения лаковых покрытий. Там же, с. 16.
8. Бабкин И. Ю. и др. Радиационно-химический участок для электронно-химического отверждения лаковых покрытий на деталях футляров телевизоров. Там же, с. 14.
9. Панин Ю. А. и др. Особенности процессов и установок радиационной очистки сточных вод пучком ускоренных электронов. Там же, с. 62.
10. Trump J. e. a. Prospects for High Energy Electron Irradiation of Wastewater Liquid Residuals. IAEA-SM-194/302.
11. Machi S. e. a. «Radiat. Phys. Chemist.», 1977, N 9, p. 371.
12. Акулов В. В. и др. Ускоритель «Электрон-3М-1» и его дальнейшая модернизация. [5], с. 25.
13. Nablo S., Frutiger W., Denholm A. Performance Characteristics of Large Aua Electron Accelerators. 1st Int. Meet. on Radiat. Proces. Puerto-Rico, 9-13 May 1976.
14. Cleland M., Thompson C., Malone H. The Prospects for Very High-Power Electron Accelerators for Processing Bulk Materials. 1st Int. Meet. on Radiat. Proces. Puerto-Rico. 9-13 May 1976.
15. Салимов Р. А. Ускорители серии ЭЛВ — параметры и применение. [5], с. 31.
16. Альбертинский Б. И. и др. Ускоритель электронов для радиационной обработки хлопчатобумажных и синтетических тканей. Там же, с. 34.

17. Альбертинский Б. И. и др. Перспективы разработки ускорителей электронов для энергоемких производств. В кн.: Труды II Всесоюз. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Ленинград, 1—3 октября 1975.
18. Глухих В. А. и др. Основы технологического воплощения радиационно-химического способа получения портландцементного клинкера. «Цемент», 1976, № 11, с. 9.
19. Смахтин Л. А. и др. Применение нейтронного генератора НГ-150 для организации технологического контроля на промышленных предприятиях. [5], с. 185.
20. Вахрушин Ю. П. и др. Линейные ускорители электронов для активационного анализа. В кн.: Труды 5 Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. М., «Наука», 1977.
21. Глухих В. А. и др. Промышленная гамма-активационная лаборатория для анализа рудных проб на золото и сопутствующие элементы. [5], с. 131.
22. Глухих В. А., Вахрушин Ю. П., Прудников П. А., Фомин Л. П. Линейные ускорители-дефектоскопы НИИЭФА для неразрушающего контроля АЭС. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 3, с. 293.
23. Вахрушин Ю. П. и др. Линейный ускоритель-дефектоскоп ЛУЭ-5-500 Д. [5], с. 190.
24. Левченко В. Г. и др. Исследование дефектоскопической чувствительности макета рентгенотелевизионного комплекса с линейным ускорителем-дефектоскопом. Там же, с. 143.
25. Swanson W. Radiation Parameters of Electron Linear Accelerators. SLAC-PUB-2092, March 1978.
26. Вахрушин Ю. П. и др. Физико-технические и дозиметрические параметры медицинского линейного ускорителя электронов ЛУЭ-15 М. [5], с. 71.
27. Будтов А. А. и др. Медицинский линейный ускоритель электронов ЛУЭ-15 МЭ с программным управлением. Там же, с. 70.
28. Богданов П. В. и др. Проектные параметры радиоизотопного циклотрона РИЦ. В кн.: Труды 6 Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. Дубна, 1978.
29. Акулова Н. В. и др. Конструктивные особенности циклотрона для производства радиоизотопов. [5], с. 79.

УДК 621.039.5.58:621.38.004.6

Анализ надежности трубопроводов и сосудов под давлением на атомных электростанциях

КЛЕМИН А. И., ШИВЕРСКИЙ Е. А.

Одними из наиболее многочисленных и важных компонентов оборудования АЭС являются трубопроводы и сосуды под давлением. Как показывает отечественная и зарубежная практика проектирования и эксплуатации АЭС, из всех отказов оборудования наибольшую потенциальную радиационную опасность представляют разрушения крупных трубопроводов, коллекторов и сосудов. Количественный анализ их надежности становится обязательной составной частью оценки надежности станции в целом на этапе проектирования. В настоящей статье представлены результаты исследования надежности трубопроводов и сосудов АЭС.

Сформулируем вначале понятие отказа рассматриваемых изделий. Отказ трубопровода или сосуда под давлением есть утрата им работоспособности вследствие разгерметизации до заданного в технической документации уровня или появления таких необратимых изменений (трещин, утонения стенки с размерами и характером, оговоренными в технической документации, и др.), которые могут затем привести к разгерметизации и выводу трубопровода (сосуда) из эксплуатации.

Для крупных трубопроводов и сосудов часто используются понятия катастрофического и потенциально опасного отказа. Катастрофическими называются отказы, при которых разрушение трубопровода (сосуда) происходит за короткое время (часто практически мгновенно), при этом размер повреждения, например, для трубопровода соиз-

мерим с его диаметром, и разрушение приводит к значительному ущербу. Катастрофический отказ требует немедленной остановки блока АЭС и проведения значительных ремонтных работ. Потенциально опасными отказами трубопроводов и сосудов являются, как правило, свищи в основном металле и сварных швах, неплотности в механических соединениях, трещины определенного размера, локальное утонение стенок (вследствие, например, коррозии или эрозии) и т. п. Потенциально опасные отказы должны своевременно устраняться, поскольку при эксплуатации часть потенциально опасных отказов может стать причиной катастрофических отказов.

Факторы, определяющие надежность трубопроводов и сосудов. Основные факторы, определяющие надежность рассматриваемых элементов оборудования, приведены в табл. 1, которая составлена на основе изучения и обобщения отечественного и зарубежного опыта эксплуатации трубопроводов и сосудов на АЭС и ТЭС. Сложность анализа причин отказов трубопроводов и сосудов заключается в том, что перечисленные факторы часто действуют совместно. В каждом случае можно говорить о доминировании нескольких факторов и о несущественном влиянии остальных. Ситуации, когда удается идентифицировать в качестве причины отказа единственный фактор, относительно редки.

Опыт эксплуатации трубопроводов и сосудов показывает, что отказы, произошедшие в начальный период, с наибольшей вероятностью вызы-