

УДК 621.039.548.343
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-26-31

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФРАГМЕНТАЦИИ ГАЗОДИФФУЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Волгин, Ю.А. Мефедова, В.Э. Белостропова

Аннотация. Проведена оценка возможности использования российского лазерного комплекса МЛТ для зарубежного проекта по выводу из эксплуатации устаревшего газодиффузионного оборудования, обладающего остаточными следами радиации, для оптимизации и ускорения технических процессов. Рассмотрен французский сценарий демонтажа с фрагментацией металлических частей диффузоров гидравлическими ножницами. Предложена альтернатива механической резке в виде использования технологии дистанционной лазерной резки. Описан состав и технические характеристики лазерного комплекса, отмечены преимущества его использования: полное отсутствие людей в радиационно-зараженной зоне, многослойная резка с одновременной фрагментацией керамических барьеров. Осуществлен расчет времени резки стального корпуса диффузора с целью обоснования производительности лазерного комплекса и проведена оценка экономической эффективности в сравнении с гидравлическими ножницами.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации; газовая диффузия; демонтаж оборудования; лазерная резка.

ГАЗ ДИФФУЗИЯЛЫК ЖАБДУУЛАРДЫ ФРАГМЕНТАЦИЯЛОО ҮЧҮН ЛАЗЕРДИК КОМПЛЕКСТИ КОЛДОНУУ МҮМКҮНЧҮЛҮГҮНӨ ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ

А.В. Волгин, Ю.А. Мефедова, В.Э. Белостропова

Аннотация. Макалада техникалык процесстерди оптималдаштыруу жана тездетүү максатында радиациянын калдыктарынын издери бар эскирген газ диффузиялык жабдууларды эксплуатациядан чыгаруу боюнча чет элдик долбоор үчүн россиялык МЛТ лазердик комплексин колдонуу мүмкүнчүлүгүнө баа берилди. Диффузорлордун металл бөлүктөрүн гидравликалык кайчы менен бөлүү менен демонтаждоонун француздук сценарийи каралат. Механикалык кесүүгө альтернатива аралыктан лазердик кесүү технологиясы түрүндө сунушталат. Лазердик комплекстин курамы жана техникалык мүнөздөмөлөрү баяндалат, аны колдонуунун артыкчылыктары белгиленет: радиация менен булганган зонада адамдардын жоктугу, керамикалык тосмолорду бир эле мезгилде фрагментациялоо менен көп катмарлуу кесүү. Диффузордун болот корпусунун кесүү убактысын эсептөө лазердик комплекстин өндүрүмдүүлүгүн негиздөө максатында жүргүзүлдү жана гидравликалык кайчы менен салыштыр-гандагы экономикалык натыйжалуулугуна баалоо жүргүзүлдү.

Түйүндүү сөздөр: эксплуатациялоодон чыгаруу; газдын диффузиясы; жабдууларды демонтаждоо; лазердик кесүү.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING A LASER COMPLEX FOR FRAGMENTATION OF GAS DIFFUSION EQUIPMENT

A.V. Volgin, Yu.A. Mefedova, V.E. Belostropova

Abstract. The article evaluates the possibility of using the Russian MTL laser complex for a foreign project to decommission obsolete gas diffusion equipment with residual radiation to optimize and accelerate technical processes. The French scenario of dismantling with fragmentation of metal parts of diffusers with hydraulic scissors is considered and an alternative such as remote laser cutting is proposed. The structure and technical characteristics of the laser complex, its main advantages such as the complete absence of people in the radiation zone, multilayer cutting

(metal and ceramic barriers) are described. The calculation of the cutting time of the steel case of the diffuser and the calculation of economic parameters were carried out in order to justify the performance of the laser complex and economic efficiency.

Keywords: decommissioning; gas diffusion; dismantling of equipment; laser cutting.

Вывод из эксплуатации (ВЭ) ядерных объектов является одним из важнейших направлений деятельности, актуальность развития которой высока и с течением времени будет только возрастать. На протяжении многих лет работы по выводу из эксплуатации ядерных объектов и реабилитации загрязненных территорий активно идут во множестве стран. Поиск новых безопасных, эффективных и экономичных технологических решений является приоритетной задачей при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). В России решение задач по безопасному и эффективному выводу из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) относится к приоритетным и перспективным направлениям деятельности Госкорпорации «Росатом».

В 2019 г. топливная компания АО «ТВЭЛ» определена Госкорпорацией «Росатом» отраслевым Интегратором по направлению бизнеса «Вывод из эксплуатации и обращение с сопутствующими РАО». Интегратор ведет активную работу по выстраиванию отраслевого взаимодействия по данному направлению, включая подготовку объектов к ВЭ и обращению с образующимися в процессе ВЭ радиоактивными отходами в России и за рубежом [1].

Актуальность работы заключается в использовании нового, уникального комплекса, который позволяет осуществлять дистанционную лазерную резку металлических и железобетонных конструкций на дальнем расстоянии от объекта.

Метод газовой диффузии стал первым методом получения промышленных количеств урана-235 на обогатительных комбинатах, но имел существенные недостатки: требовал больших затрат электроэнергии (что приводило к высокой стоимости конечного продукта), был небезопасным для персонала (из-за высоких температур и шума в цехах), а большие объемы химически активных смесей под давлением являлись источниками потенциальных выбросов и загрязнений окружающей среды. На смену данному способу в настоящее время пришел метод газовой центрифуги.

Объектом ВЭ является газодиффузионное производство – завод Georges Besse (Франция), который был способен снабжать 90 реакторов мощностью 1 ГВт и обеспечивать около 25 % мировых потребностей в обогащенном уране для реакторного топлива [2]. Завод проработал до 2012 г., а сценарий работ по выводу его из эксплуатации расписан до 2051 года.

Демонтаж завода включает в себя 1400 ступеней диффузионного каскада, из которых 160 тыс. тонн стали, 30 тыс. тонн металлического оборудования, более 1300 км трубопроводов [3]. Французский сценарий проведения демонтажных работ выглядит следующим образом: операции по промывке установок; отсекание диффузоров от технологической цепочки; продувка сжатым воздухом для удаления механического налета на внутренних полостях газодиффузионных машин; химическая обработка кислородом для удаления пленки; разборка машин; резка крупногабаритного оборудования с использованием гидравлических ножниц, установленных на экскаваторах; компактирование (опрессовывание) отходов и их упаковка; хранение и отгрузка отходов.

Каждая диффузионная ступень состоит из четырех основных компонентов: собственно диффузор (корпус, внутри которого закреплено большое количество диффузионных барьеров), компрессор, обеспечивающий циркуляцию газов обедненного и обогащенного урана, теплообменник и мотор (рисунок 1). Операции по демонтажу диффузоров включают разрезание при помощи механической резки корпуса для получения доступа к внутренним деталям, включая барьеры, которые впоследствии дробятся.

Компания АО «ТВЭЛ» предлагает французской стороне альтернативу ножницам в виде использования технологии дистанционной резки посредством мобильного лазерного комплекса, разработанного АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»[4] (рисунок 2).

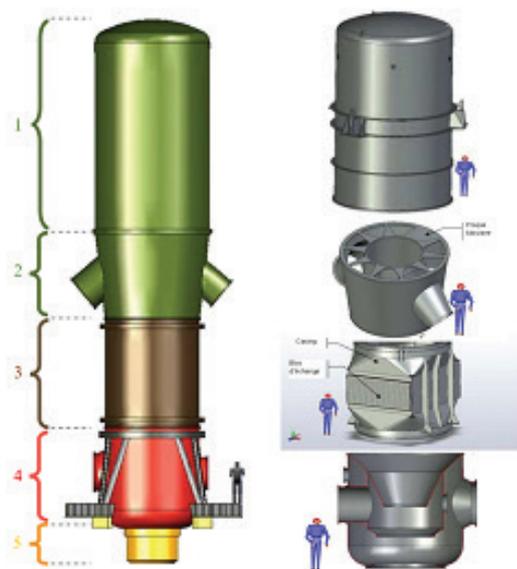


Рисунок 1 – Составляющие диффузора:
1 – делитель; 2 – трубопроводы коммуникаций ступени; 3 – теплообменник;
4 – компрессор; 5 – мотор, приводящий в действие компрессор

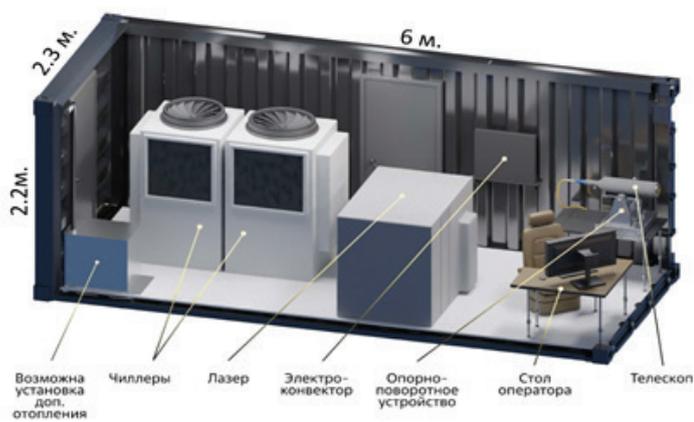


Рисунок 2 – Мобильный лазерный технологический (МЛТ) комплекс

Технические характеристики лазера представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики лазера

Техническая характеристика	Параметры
Мощность излучения	21 кВт
Глубина реза	0,44 м
Скорость лазерной резки конструкций толщиной до 100 мм в автоматическом режиме	1–20 м/ч
Энергопитание	65 кВт
Климатические условия	От -50° до $+40^{\circ}$ С

В рамках проекта дополнительно рассматривается возможность использования систем локального улавливания отходящих газов и дисперсных частиц в зоне реза, а также систем дистанционного теплового контроля (рисунок 3).

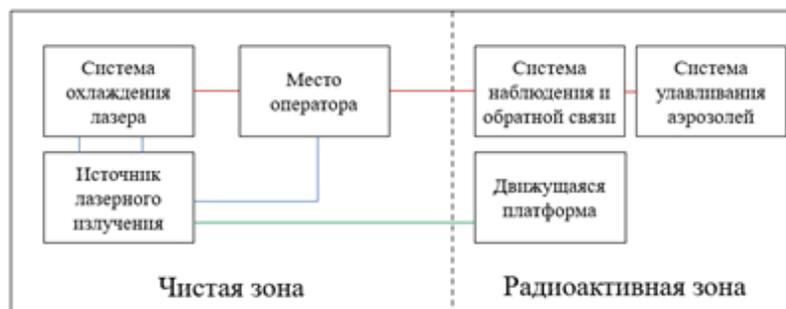


Рисунок 3 – Схема процесса дистанционной лазерной резки

Для обоснования возможности использования лазера проведена оценка времени резки для верхнего основания наиболее большого по размерам диффузора типа USG, время резки которого ножницами составляет 25 часов [3]. Исходные данные для расчета времени резки стального корпуса диффузора представлены в таблице 2, а результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета времени резки стального корпуса

№	Параметр	Значение
1	Высота диффузора L , м	10
2	Внутренний диаметр диффузора $d_{СТ}$, м	4,9
3	Толщина стенки диффузора $h_{СТ}$, мм	80
4	Диаметр лазера d , мм	10
5	Температура окружающей среды T_0 , °C	25
6	Мощность лазера P , кВт	21
7	Температура плавления стали $T_{плст}$, °C	1420
8	Плотность стали $\rho_{СТ}$, кг/м ³	7900
9	Теплота плавления стали $\lambda_{СТ}$, Дж/кг	$84 \cdot 10^3$
10	Количество разрезов в поперечном сечении N	10

При расчете энергии необходимо учесть, что часть излучения отражается от поверхности металла, но возможно принудительное нанесение химических покрытий, способствующих повышению поглощающей способности металла, поэтому потерями тепла на нагрев окружающего воздуха можно пренебречь [5].

Время, необходимое на резку металлического корпуса, равно 10,8 ч. Фрагментации необходимо подвергнуть 1400 диффузоров, поэтому на демонтаж будет затрачено 7 лет с использованием лазерной установки и 18 лет – с использованием гидравлических ножниц. Лазерный комплекс значительно сократит время резки, затрачиваемое на процесс демонтажа. Сравнение основных экономических показателей при использовании для фрагментации лазерного комплекса и гидравлических ножниц приведено в таблице 4.

Таблица 3 – Результаты расчетов для стального корпуса

№	Параметр	Формула	Значение
1	Площадь сечения стенки S_{CT} , м ²	$S_{CT} = \pi \left(\left(\frac{d_{CT}}{2} + h_{CT} \right)^2 - \left(\frac{d_{CT}}{2} \right)^2 \right)$	1,252
2	Объем стали V_{CT} , м ³	$V_{CT} = S_{CT} \cdot d$	0,0125
3	Масса стали m_{CT} , кг	$m_{CT} = \rho_{CT} \cdot V_{CT}$	98,8
4	Энергия, необходимая для нагрева стали до температуры плавления Q_{HT} , кДж	$Q_{HT} = c \cdot m_{CT} \cdot (T_{плст} - T_0)$ $Q_{HT} = m_{CT} \int_{T_0}^{T_{плст}} c_{CT}(T) dT$	69450,5
5	Аппроксимированная зависимость теплоемкости стали от температуры	$c_{CT}(T) = -0,0001 \cdot T^2 + 0,1414 \cdot T + 470,33$	
6	Энергия, необходимая для плавления стали $Q_{пл}$, кДж	$Q_{плст} = \lambda_{CT} \cdot m_{CT}$	8301
7	Энергия, необходимая для резки стали Q , кДж	$Q_{CT} = Q_{HT} + Q_{плст}$	77782,5
8	Время одного разреза стали t_N , с (ч)	$t_{NCT} = \frac{Q_{CT}}{P}$	3889 (1,08)
9	Время резки стального корпуса диффузора t_p , ч	$t_{PCT} = t_{NCT} \cdot N$	10,8

Таблица 4 – Сравнительная таблица проектов России и Франции

Параметры	Валюта	Россия	Франция
ЗП персонала за весь период	€	460895	1120000
Расходы на обучение	€	100 000	
Арендная плата	€	1 800 000	
Амортизация	€		1771255
Расходы на топливо	€		1522500
Расходы на электроэнергию	€	121705	
Прочие расходы (2 % от ФОТ)	€	9218	22400
Страхование	€	12396	
Транспортировка	€	12396	
Система газоулавливания	€	480 775	
Итого расходов	€	2972593	4436155

Фрагментация газодиффузионных установок лазером не только имеет безопасный подход и ускоряет процесс, но и уменьшает финансовые затраты.

Основные преимущества предлагаемого метода: высокая производительность, чистота и экологичность (минимум пыли и дыма), технология минимизации образования шлака (вторичные отходы производства), отсутствие необходимости в расходных материалах, низкая стоимость эксплуатации, совместимость с другим оборудованием для различных применений при выводе из эксплуатации ядерных объектов, долгий срок службы в высокоактивной среде, полное отсутствие людей в радиационно-зараженной зоне в процессе работы (вынесение оборудования и операторов в безопасную зону).

Поступила: 22.02.22; рецензирована: 09.03.22; принята: 15.03.22.

Литература

1. Вывод из эксплуатации. URL: <https://www.tvcl.ru/activity/new-business-direction/decommission/> (дата обращения: 10.12.2021).
2. Закалюкина Л.А. Виды и параметры процесса лазерной резки / Л.А. Закалюкина, В.Я. Баннов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016. № 19. С. 163–167.
3. Rapport de la commission et conclusions motivées. URL: http://www.drome.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_eurodif_demantelement_compresse.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
4. Мобильный лазерный комплекс (МЛК). URL: <https://www.triniti.ru/catalog/lazernye-tehnologii/mobilnyu-lazernyy-kompleks-mltk/> (дата обращения: 10.12.2021).
5. Панкратов Д.Л. Определение технологических режимов резки оптоволоконным лазером / Д.Л. Панкратов, Е.Д. Неделькина // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы: сб. науч. статей II Межд. молодежной научно-техн. конф. г. Курск, 17–18 июня 2016 г. Курск, 2016. С. 66–69.