

УДК 669.822

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/61

*М.К. КЫЛЫШКАНОВ, Н.Н. ЯРОШЕНКО, Е.В. КИРИЛЛОВ, Т.М. АЛДАЖАРОВ,
А.В. БОЛТАНОВ, А.В. ДОЛГАНОВ, М.В. ТИТОВ*

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯДЕРНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Проведена оценка модернизации технологической схемы изготовления топливных таблеток на качественные показатели производства ядерного топлива. В ходе работ был отработан алгоритм загрузки, выгрузки и продолжительности смешивания порошка в планетарно-шнековом смесителе, обеспечивающий высокую однородность смешивания. Внедрение в технологический процесс прессы с таблетоукладчиком позволило увеличить массу загружаемых прессовок в лодки и снизить их травмируемость, тем самым повысив производительность операции прессования. Реализован комплекс работ по увеличению плотности прессовок, который позволил улучшить внешний вид спеченных таблеток и, как следствие, повысить показатель выхода в «годное» на операции разбраковки. Сокращена периодичность загрузки таблеток в печь спекания, что способствовало увеличению производительности печей и снижению энергозатрат. Успешно проведена сертификация в компании AREVA в соответствии с технической документацией, применяемой для производства топливных таблеток.

Ключевые слова: ядерное топливо, модернизация технологического процесса, диоксид урана, порошковая металлургия.

Введение

Урановое производство АО «Ульбинский металлургический завод (УМЗ)» – это уникальный и один из крупнейших в мире комплекс по производству уранового топлива для атомных электростанций, имеющий огромный опыт работы в ядерной отрасли. Высокое качество продукции позволяет Ульбинскому металлургическому заводу быть активным участником мирового рынка ядерного топлива для АЭС.

На протяжении не одного десятилетия, до недавнего времени, АО «УМЗ» являлся одним из основных поставщиков топливных таблеток для российских реакторов. Главными видами продукции были топливные таблетки для реакторов российского дизайна – ВВЭР и РБМК, как стандартные, состоящие из чистого диоксида урана, так и с использованием различных химических добавок для повышения физико-химических показателей ядерного топлива. Богатый опыт освоения новых технологических процессов и совершенствования уже внедренных технологий, постоянная нацеленность на выполнение не только существующих, но и перспективных требований к качеству продукции, позволили специалистам АО «УМЗ» сохранить уверенность в своих возможностях при решении практически любых задач в данной сфере деятельности.

В связи с увеличением объемов производства топливных таблеток на российских заводах АО «ТВЭЛ» объемы поставок таблеток АО «УМЗ» стремительно сокращались и возникал вопрос о дальнейшей деятельности уранового производства. Наиболее верным решением являлось освоение производства топливных таблеток для реакторов других ведущих мировых (не российских) энергетических компаний и выходом на международный рынок. При удачном стечении обстоятельств это позволяло надеяться на получение стабильных заказов на услуги по изготовлению таблеток, а в перспективе – и топливных сборок.

В этих условиях в связи с развитием совместного проекта по добыче природного урана наиболее перспективным направлением был выход на китайский рынок с таблетками для реакторов дизайна французской компании AREVA (ныне – Framatome).

Стало очевидно, что использование существующей технологии, основанной на приготовлении пресс-порошка с использованием жидкого связующего (пластификатор на основе поливинилового спирта и глицерина), при имеющемся аппаратурном оформлении не может обеспечить требований спецификации AREVA по многим параметрам, таким, как микроструктура, термическая стабильность, геометрическая плотность и т.д. На рис. 1 приведены примеры фрагментов пористой структуры с использованием жидкого и сухого связующего.

В связи с этим необходимо было разрабатывать новую технологию приготовления пресс-порошка с использованием сухих смазок, как это и практикуют все ведущие компании мира. Ситуация осложнялась очень ограниченным выбором оборудования, которое можно было вовлечь в

технологический процесс и тем, что в АО «УМЗ» практически отсутствовал опыт работы с сухими смазками при изготовлении топливных таблеток.

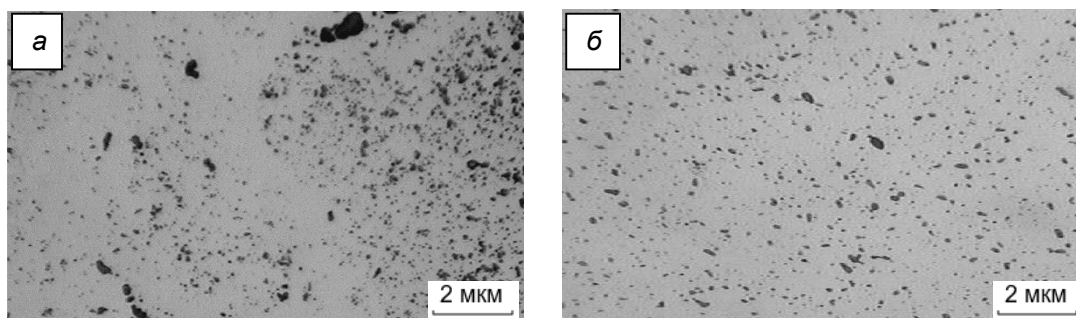


Рис. 1. Пористая структура топливных таблеток: *а* – с использованием жидкой связки; *б* – с использованием сухой связки

Эти непростые задачи достаточно оперативно решались сначала в лабораторных условиях, а затем и в промышленных. Так была разработана, смонтирована и успешно опробована принципиально новая линия мехобработки и грануляции порошков, состоящая из смесителей, валкового пресса, вибромельницы и виброгранулятора. Особое внимание уделялось технологии введения сухой смазки стеарата цинка и порообразователя азодикарбонамида (АДКА), с помощью которого планировалось регулировать плотность и термическую стабильность спеченных таблеток. Порядок ввода добавок играл большую роль для получения равномерной пористой и зеренной структуры таблеток. Были проведены многочисленные эксперименты по изучению зависимости количества вводимого порообразователя на плотность таблеток. Результатом этой работы явилось получение эмпирической формулы зависимости количества вводимого АДКА на величину снижения плотности спеченных таблеток.

Успешная сертификация процесса и оборудования для изготовления топливных таблеток в соответствии с требованиями AREVA позволила предприятию сертифицироваться у потенциальных потребителей продукции компаний CGNPC-URC, CJNF.

Итогом работы, проведенной специалистами АО «УМЗ» в течение 2009–2010 гг., стала разработанная технология получения топливных таблеток, соответствующих требованиям спецификации AREVA.

В 2015–2016 гг. была проведена модернизация технологического процесса изготовления топливных таблеток в связи с необходимостью увеличения производительности и повышения качества выпускаемой продукции путем установки нового оборудования и оптимизации технологических режимов.

Методика проведения работ

На первом этапе работ была проведена модернизация участка приготовления и комплектования партий порошков оксидов урана.

В разработанной технологической схеме при шихтовании партий порошков оксидов урана использовался смеситель барабанного типа. Однако недостатком смесителей барабанного типа (как и любых других смесителей, в которых порошок движется по повторяющейся траектории) является сегрегация (расслоения частиц порошка в зависимости от их размеров и массы), которая не позволяет достичь высокой степени однородности при смешении. Особенно ярко это проявляется при смешении порошков, значительно различающихся между собой по физико-химическим характеристикам [1]. Еще одним значительным недостатком смесителей данного типа является узкий диапазон масс смешиваемых порошков (от 1000 до 2100 кг). Очевидно, что конструкция существующих смесителей барабанного типа существенно ограничивает возможности уранового производства при приготовлении пресс-порошков и изготовлении таблеток в соответствии со спецификациями существующих и потенциальных потребителей. Многие зарубежные и российские производители порошков и таблеток в настоящее время для смешения используют смесители, обеспечивающие сложную, практически неповторяющуюся траекторию движения порошка, что позволяет исключить явление сегрегации и обеспечить высокое качество смешения.

В 2015 г. был приобретен и установлен планетарно-шнековый смеситель Vrieco-Nauta типа 15 VV-5 (рис. 2).

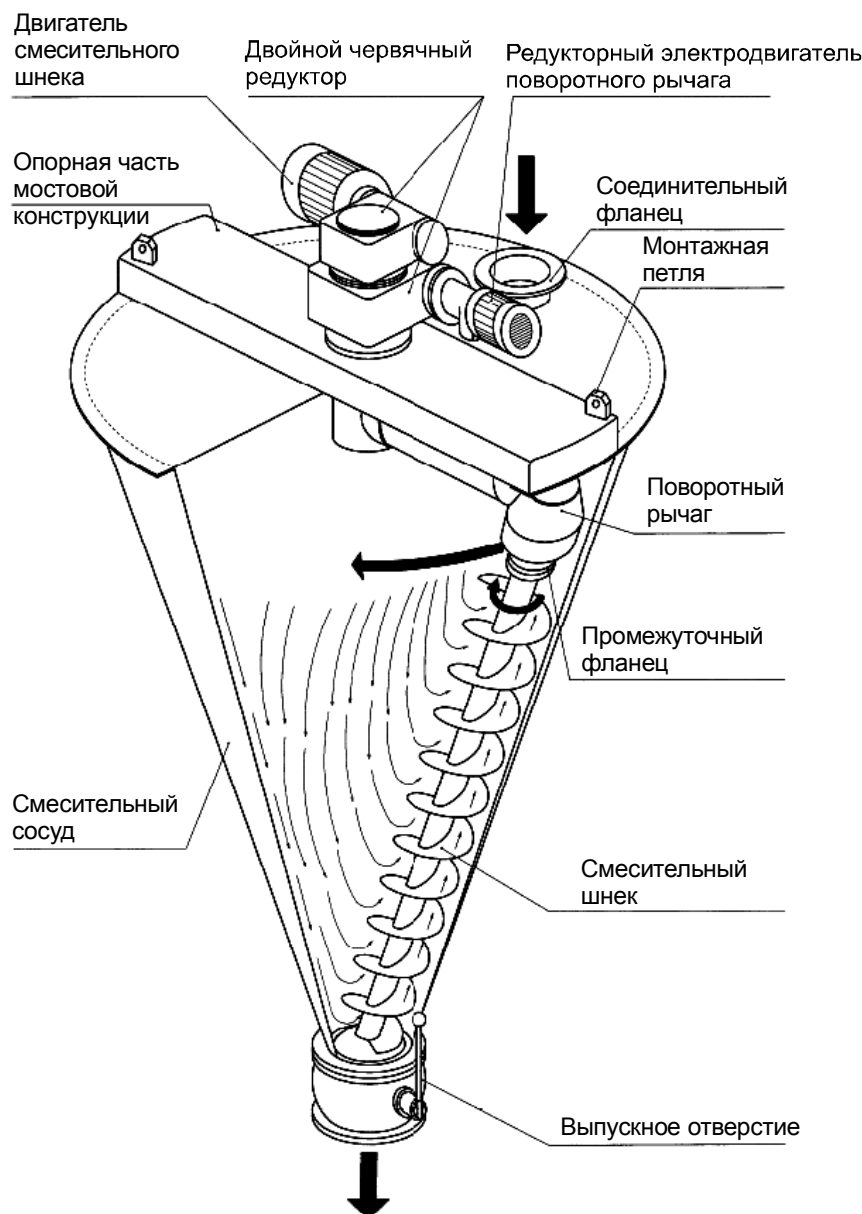


Рис. 2. Планетарно-шнековый смеситель

Принцип работы смесителя основан на трехстороннем смешивающем действии, которое является результатом совместного движения вращающихся элементов в коническом смесительном сосуде.

Были проведены испытания планетарно-шнекового смесителя по подбору алгоритма смешивания и оценке возможности достижения однородности смешивания порошков оксидов урана. Основываясь на результатах испытаний, были определены массы минимальной и максимальной партий порошков оксидов урана, смешиваемых в планетарно-шнековом смесителе, отработан алгоритм работы этого смесителя (порядок загрузки, выгрузки и продолжительность смешивания), обеспечивающий высокую однородность смешивания.

Использование планетарно-шнекового смесителя, наряду с обеспечением высокой однородности смешивания за короткий интервал времени, позволило увеличить диапазон массы смешиваемых порошков оксидов урана с 1000–2100 до 500–2850 кг, что привело к сокращению количества и массы проб при дальнейшем контроле.

На втором этапе работ была проведена корректировка используемого пресс-инструмента, режимов прессования и запуск пресса с таблетоукладчиком на участке формования прессовок.

Недостатками операции формования на тот момент являлись низкие прочностные характеристики прессовок и высокая травмируемость их в процессе транспортировки и укладки в лодку. Проведенные ранее исследования показали, что формование прессовок в более высокую плотность ($5.65\text{--}5.85\text{ г/см}^3$) приводит к улучшению внешнего вида прессовок, спеченных таблеток и, как следствие, к увеличению выхода в «годное» на операции разбраковки. Однако при увеличении плотности прессовок происходит увеличение диаметров спеченных таблеток и соответственно увеличение количества шлифотходов при их шлифовании.

С целью уменьшения количества шлифотходов (при увеличении плотности прессовок на операции формования до $5.65\text{--}5.85\text{ г/см}^3$) проводились расчеты для корректировки размеров пресс-инструмента. По их результатам был изготовлен новый пресс-инструмент. Проведен запуск и отработаны режимы формования на прессе «COURTOY» с таблетоукладчиком, что позволило увеличить массу загружаемых прессовок в лодки на 15% и снизить их травмируемость в процессе укладки в лодку, тем самым повысив производительность операции прессования. Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице.

Показатель выхода в «годное»

Параметры пресса	Выход в «годное», %	Количество брака, %	Разбраковка по видам брака, %	
			Трещины	Сколы
Пресс без таблетоукладчика	83.3	16.7	5.5	11.2
Пресс с таблетоукладчиком	89.5	10.5	2.2	8.3

На третьем этапе работ была проведена корректировка режимов на операции спекания топливных таблеток. Ранее спекание таблеток в печи TER проводили при периодичности загрузки лодок с таблетками в печь 75 мин. Проведенные исследования показали возможность сокращения периода загрузки лодочки в печь до 60 мин без ухудшения качественных показателей таблеток. Уменьшение периодичности загрузки лодок с таблетками в печь приводит к увеличению производительности и к снижению затрат процесса спекания топливных таблеток.

Для выполнения требований 100%-го контроля диаметра и высоты топливных таблеток в кратчайшие сроки силами ТОО «УМЗ-Инжиниринг» была разработана, смонтирована и опробована линия контроля таблеток с использованием лазерных анализаторов LaserMike. По результатам испытаний был выпущен отчет об аттестации линии автоматизированного контроля геометрических размеров топливных таблеток, утвержденный в AREVA.

Для обеспечения технологического контроля диаметра, оценки конусности и овальности, определения геометрических размеров таблеток с применением оптических методов измерения высоты и диаметра были установлены системы измерения с лазерным датчиком ZUMBACH Electronic AG, осуществлена их адаптация для решения поставленной задачи по измерению диаметра, высоты, конусности и овальности таблеток.

По окончании модернизации технологического процесса была проведена повторная сертификация процесса изготовления топливных таблеток UO_2 на производственной линии уранового производства АО «УМЗ». Она подтвердила, что таблетки, выпущенные с использованием нового оборудования и откорректированных технологических режимов, соответствуют требованиям спецификации и технологической документации по всем анализируемым показателям: геометрическая плотность, шероховатость, термическая стабильность, геометрические размеры, содержание массовой доли водорода, микроструктура и химические примеси.

Таким образом, Ульяновский металлургический завод успешно прошел все виды контроля, предусмотренного технической документацией по аттестации процесса изготовления таблеток UO_2 , применяемой в компании AREVA, и был успешно сертифицирован для производства топливных таблеток.

Заключение

Проведена оценка модернизации технологической схемы изготовления топливных таблеток на качественные показатели производства ядерного топлива.

В ходе проведения работ были определены массы минимальной и максимальной партий порошков оксидов урана, смешиваемых в смесителе, отработан алгоритм (порядок загрузки, порядок и продолжительность смешивания, порядок выгрузки), обеспечивающий высокую однородность смешивания.

Внедрение в технологический процесс пресса с таблетоукладчиком позволило увеличить массу загружаемых прессовок в лодки на 15% и снизить их травмируемость в процессе укладки в лодку, тем самым повысить производительность операции прессования.

Проведен комплекс работ по увеличению плотности прессовок с 5.15–5.45 до 5.65–5.85 г/см³:

- рассчитан, изготовлен и опробован новый пресс-инструмент с откорректированными размерами и возможностью его использования при формовании прессовок в плотность 5.65–5.85 г/см³;

- подтверждено улучшение внешнего вида спеченных таблеток за счет увеличения плотности прессовок, и, как следствие, повышен показатель выхода в «годное» на операции разбраковки.

Сокращена периодичность загрузки таблеток в печь TER при спекании с 75 до 60 мин, что приводит к увеличению производительности печей и снижению энергозатрат на операции спекания.

Итогом работы, проведенной специалистами АО «УМЗ», стала корректировка технологии изготовления топливных таблеток дизайна компании AREVA, а также успешно проведенная сертификация, которая подтвердила, что имеющееся оборудование и разработанные параметры технологического процесса позволяют изготавливать продукцию, соответствующую требованиям спецификации и технологической документации.

Таким образом, Ульбинский металлургический завод успешно прошел сертификацию в компании AREVA в соответствии с технической документацией, применяемой для производства топливных таблеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорченко И. М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник. – Киев: Наукова Думка, 1985.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

АО «Ульбинский металлургический завод»,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Кылышканов Манарбек Калымович, д.ф.-м.н., начальник НЦ АО «УМЗ», e-mail: KylyshkanovMK@ulba.kz;
Ярошенко Наталья Николаевна, начальник лаборатории НЦ АО «УМЗ», e-mail: YaroshenkoNN@ulba.kz;
Кириллов Евгений Викторович, ведущ. инженер-исследователь НЦ АО «УМЗ», e-mail: KirillovEV@ulba.kz;
Алдажаров Тимур Муратович, ведущ. инженер-исследователь НЦ АО «УМЗ», e-mail: AldazharovTM@ulba.kz;
Болтанов Алексей Владимирович, заместитель директора по производству УП АО «УМЗ», e-mail: BoltanovAV@ulba.kz;
Долганов Антон Владимирович, технолог отделения УП АО «УМЗ», e-mail: DolganovAV@ulba.kz;
Титов Максим Васильевич, технолог отделения УП АО «УМЗ», e-mail: TitovMV@ulba.kz.

*M.K. KYLYSHKANOV, N.N. YAROSHENKO, E.V. KIRILLOV, T.M. ALDAZHAROV,
A.V. BOLTANOV, A.V. DOLGANOV, M.V. TITOV*

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR PRODUCING NUCLEAR CERAMIC FUEL

The impact of the modernization of the technological scheme for the production of fuel pellets on the quality indicators of the production of nuclear fuel is assessed. In the course of the work, an algorithm for loading, unloading and mixing duration of powder in a planetary screw mixer was worked out, which ensures high homogeneity of mixing. The introduction of a press with a tablet-laying machine into the technological process made it possible to increase the mass of the loaded compacts into the boats and reduce their injury rate, thereby increasing the productivity of the pressing op-

eration. A set of works was implemented to increase the density of compacts, which made it possible to improve the appearance of the sintered tablets and, as a result, to increase the rate of «@good» yield for the sorting operation. The frequency of loading the tablets into the sintering furnace has been reduced, which contributed to an increase in furnace productivity and a decrease in energy consumption. AREVA has been successfully certified in accordance with the technical documentation used for the production of fuel pellets.

Keywords: *nuclear fuel, technological process modernization, uranium dioxide, powder metallurgy.*

Joint Stock Company «Ulba Metallurgical Plant»,
Ust-Kamenogorsk, Republic Kazakhstan

Kylyshkanov Manarbek Kalymovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Scientific Center of JSC «UMP», e-mail: KylyshkanovMK@ulba.kz;

Yaroshenko Natalya Nikolaevna, Head of the Laboratory of the Scientific Center of JSC «UMP», e-mail: YaroshenkoNN@ulba.kz;

Kirillov Evgeniy Viktorovich, Leading Research Engineer, Scientific Center of JSC «UMP», e-mail: KirillovEV@ulba.kz;

Aldazharov Timur Muratovich, Leading Research Engineer, Scientific Center of JSC «UMP», e-mail: AldazharovTM@ulba.kz;

Boltanov Alexey Vladimirovich, Deputy Director for Production of UD JSC «UMP», e-mail: BoltanovAV@ulba.kz;

Dolganov Anton Vladimirovich, Technologist of the Department of UD JSC «UMP», e-mail: DolganovAV@ulba.kz;

Titov Maxim Vasilievich, Technologist of the Department of UD JSC «UMP», e-mail: TitovMV@ulba.kz.