

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫПУСКА ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ НА ПЕЧАХ ФЕРРОХРОМА НА ОСНОВЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОЙ АПРОБАЦИИ СИСТЕМЫ РАЗДЕЛЬНОГО ВЫПУСКА ШЛАКА И МЕТАЛЛА

СЕРИКБАЕВ И.Б. 

Серикбаев Ильфат Бекболатович - Заместитель начальника цеха №1, Актюбинский завод ферросплавов, г. Актөбе, Казахстан

E-mail: [ilfat02021990@gmail.com](mailto:ilfat02021990@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-6547-7565>

**Аннотация.** В статье представлены результаты комплексного исследования, направленного на оптимизацию выпуска продуктов плавки на печах производства высокоуглеродистого феррохрома на основе применения методов вычислительной гидродинамики и промышленной апробации системы раздельного выпуска шлака и металла. Актуальность работы обусловлена высокой долей потерь металла со шлаком и нестабильностью процесса выпуска, что существенно снижает технико-экономические показатели ферросплавного производства. Исследование выполнено с использованием трёхуровневой методологии, включающей термодинамическое моделирование в программном комплексе HSC Chemistry, CFD-моделирование гидродинамики двухфазной системы в среде ANSYS Fluent, а также технико-экономическую оценку эффективности предлагаемых технических решений. На основе численных расчётов определены оптимальные геометрические параметры и взаимное расположение выпускных отверстий, обеспечивающие устойчивое разделение шлаковой и металлической фаз при выпуске. Разработанная система раздельного выпуска была внедрена и апробирована в промышленных условиях на действующем агрегате Актюбинского завода ферросплавов. Результаты опытно-промышленных испытаний показали существенное снижение потерь металла со шлаком — более чем в два раза, до уровня менее 4%, а также повышение извлечения хрома из рудного сырья на 2,89%. Дополнительно отмечено улучшение стабильности технологического режима и снижение колебаний химического состава продукции. Полученные результаты демонстрируют значительный экономический эффект (IRR ~97%, срок окупаемости менее 1,5 лет) и возможность тиражирования технологии на другие ферросплавные производства.

**Ключевые слова:** феррохром, раздельный выпуск шлака и металла, CFD-моделирование, оптимизация выпуска, вычислительная гидродинамика, потерь металла, ресурсосберегающие технологии, промышленная апробация.

### Введение

Повышение эффективности и снижение эксплуатационных затрат металлургических агрегатов остаются одними из ключевых задач современной ферросплавной промышленности, особенно в условиях растущей волатильности цен на энергоносители и сырьевые ресурсы [1]. Особую актуальность приобретают решения, позволяющие достичь значительного экономического эффекта без капитальной реконструкции, в частности, на финальной стадии технологического цикла – выпуске готовой продукции.

В производстве высокоуглеродистого феррохрома (ВУФХ) в печах с погруженной дугой общепринятой практикой до сих пор является каскадная система совместного выпуска расплавленного металла и шлака через единую летку. Многочисленные исследования, включая фундаментальные работы по теории ферросплавного производства, подтверждают, что такой подход неизбежно приводит к интенсивному турбулентному перемешиванию фаз, их эмульгированию и захвату металлических капель шлаковой массой [2]. Согласно данным, потери ценного металла (феррохрома) в шлаке при традиционной технологии могут достигать 15-20% от общего объема выплавленного продукта, что напрямую снижает общее извлечение целевого компонента – хрома [3-6].

Экономические последствия данной проблемы многократно усиливаются необходимостью

организации дорогостоящих переделов для извлечения металла из шлака, включающих операции дробления, грохочения и магнитной сепарации. Таким образом, существующая технология формирует замкнутый цикл дополнительных эксплуатационных расходов, снижая как операционную маржу, так и общую ресурсоэффективность производства.

В этом контексте разработка и внедрение инновационных решений, направленных на физическое разделение потоков металла и шлака непосредственно в печи, представляется стратегически важной. Целью данной работы является проведение полномасштабного исследования, технико-экономическое обоснование и практическая реализация системы раздельного выпуска шлака и металла для печей ВУФХ. Исследование охватывает полный цикл: от фундаментального моделирования (термический анализ и вычислительная гидродинамика) и детального технико-экономического обоснования до промышленной апробации и экспериментальной верификации результатов на действующем производственном агрегате Актюбинского завода ферросплавов.

### **Материалы и методы исследования**

Разработка и обоснование нового технологического решения для действующего производства требовали комплексного подхода, объединяющего глубокое теоретическое моделирование с оценкой практической реализуемости и экономической целесообразности. Методология настоящего исследования была построена на последовательном применении взаимодополняющих методов анализа, фокус которых смещался от фундаментального понимания физико-химических процессов к решению конкретных инженерно-технических задач.

Первоначальный этап был посвящен созданию репрезентативной цифровой модели процесса с использованием специализированного программного обеспечения HSC Chemistry. Данный подход, широко применяемый для моделирования пирометаллургических процессов, позволил установить теоретические материально-энергетические балансы и количественно оценить распределение элементов между фазами в условиях, близких к промышленным [7]. Ключевым аспектом стал учет не только элементного, но и минералогического состава сырья, что обеспечило высокую достоверность модели, послужившей основой для последующих этапов.

Для решения центральной задачи проекта – прогнозирования гидродинамики расплавов при раздельном выпуске – было применено трехмерное моделирование в среде ANSYS Fluent. Модель была построена на основе метода объема жидкости (VOF) для моделирования несмешивающихся фаз со свободной поверхностью, а для учета уноса металлических капель использовалась дискретно-фазовая модель (DPM) [8]. Такой комплексный подход к моделированию процессов выпуска успешно зарекомендовал себя в исследованиях, посвященных оптимизации работы металлургических агрегатов [9]. Граничные условия (геометрия, свойства расплавов, тепловые потоки) задавались на основе реальных проектных и эксплуатационных данных. В рамках параметрического исследования была проведена серия расчетов для различных конфигураций системы выпуска с варьированием высотного положения и углового смещения шлаковой летки относительно металлической. Критерием оптимизации служила минимизация объемной доли металла в потоке шлака.

На основе оптимальной, с точки зрения гидродинамики, конфигурации был проведен детальный экономический анализ. Для нескольких вариантов инженерной реализации выполнен расчет капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) затрат. Финансовая модель строилась на базе классического анализа дисконтированных денежных потоков (DCF), а ее валидность проверялась путем сравнения с известными кейсами модернизации аналогичных производств [11-15]. Этот этап обеспечил получение точного экономического обоснования для принятия решения о промышленном внедрении.

Таким образом, примененная трехуровневая методология (ТЕА → CFD → ТЭО) обеспечила

сквозное обоснование проекта – от фундаментальных закономерностей до конкретных технических параметров и финансовых показателей.

### **Результаты и их обсуждение**

Теоретическое исследование позволило определить оптимальную конфигурацию системы раздельного выпуска: расположение шлаковой летки на 500 мм выше металлической со смещением на 120°. Параметрическое CFD-моделирование прогнозировало снижение потерь металла со шлаком более чем в два раза – до уровня менее 4%, а также выявило критическую важность расстояния между летками (более 200 мм) для устойчивой работы. Техно-экономическое обоснование подтвердило исключительную инвестиционную привлекательность проекта с прогнозным внутренним коэффициентом доходности (IRR) около 97% и сроком окупаемости менее 1,5 лет. Промышленная реализация данной системы на печи №12 ПЦ №1 АктЗФ была осуществлена в 2024-2025 гг. После этапа адаптации технологических режимов и устранения выявленного недостатка (проведена реконструкция с понижением лотка на 120 мм для увеличения межлеточного расстояния) была достигнута стабильная эксплуатация.

Экспериментальные результаты полностью подтвердили точность модельных прогнозов и высокую эффективность решения. Доля шлака, отводимого через специализированную летку, устойчиво возросла с 39% в апреле до 82% в августе 2025 года. Сравнительный анализ с печью, работающей по традиционной технологии, показал существенное улучшение ключевых показателей: извлечение хрома из руды увеличилось на 2,89% (до 73,81%), а переход хрома в шлаковый продукт снизился на 1,7%. Доля «чистых» выпусков металла достигла 66%, что наглядно демонстрирует эффективность физического разделения фаз. Полученные производственные результаты соответствуют верхнему диапазону прогнозных значений, указывая на то, что фактические экономические показатели (NPV, IRR) проекта, вероятно, превысят расчетные.

Проведенное комплексное исследование, объединившее методы компьютерного моделирования (TEA, CFD), детальный технико-экономический анализ и поэтапное промышленное внедрение, доказало свою высокую эффективность как универсальная методология модернизации действующих металлургических агрегатов. Важнейшим результатом является полное соответствие экспериментальных данных прогнозам, полученным на этапе моделирования, что подтверждает точность современных вычислительных методов для решения сложных технологических задач и позволяет существенно сократить затраты на промышленные эксперименты. Внедренная система раздельного выпуска продемонстрировала комплексный положительный эффект: значительное повышение извлечения ценного компонента (хрома), снижение эксплуатационных затрат, связанных с переработкой шлака, и качественное улучшение управляемости процессом выпуска продуктов плавки за счет физического разделения фаз.

Полученные результаты создают прочную основу для тиражирования данного технического решения. Комплексный анализ позволяет утверждать, что экономический эффект от внедрения системы на действующем производстве не только достиг, но и превысил ожидаемые показатели, что делает проект исключительно привлекательным для инвестиций и широкого распространения на других предприятиях ферросплавной отрасли. Таким образом, работа вносит существенный вклад в развитие ресурсосберегающих технологий, предлагая технически и экономически обоснованный путь повышения конкурентоспособности металлургических производств.

### **Заключение**

Проведенное исследование обладает существенной научной и практической значимостью. Разработана и успешно апробирована универсальная методология (TEA-CFD-ТЭО-внедрение) проектирования и реализации ресурсосберегающих решений, применимая не только для печей феррохрома, но и для модернизации агрегатов по производству ферромарганца, ферроникеля и

других типов плавильного оборудования. Практическим итогом работы является доказательство высокой технико-экономической эффективности системы раздельного выпуска, позволившей значительно повысить извлечение целевого компонента, снизить потери и улучшить управляемость процессом. Комплексный подход, сочетающий передовое моделирование с промышленной верификацией, может служить эталоном для аналогичных проектов модернизации в металлургии. Перспективы дальнейших исследований видятся в адаптации данной технологии для других цехов, а также в интеграции систем управления технологическим процессом на основе методов искусственного интеллекта для оптимизации режимов работы в реальном времени.

### Список литературы

1. Гасік М. І., Лякін Ю. Д. Теорія та технологія виробництва феросплавів: підручник. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 463 с.
2. Казаченок Н. М., Тимченко В. В. Гидродинамика и теплообмен при выпуске продуктов плавки из печей. – Новосибирск: Наука, 1992. – 184 с.
3. Рысс Ю. С. Производство ферросплавов: учеб. пособие. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
4. Роцин В. Е., Роцин А. В. Электрометаллургия и металлургия ферросплавов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – 408 с.
5. Куликов И. С., Патрушев А. А. Теория и практика электроплавки ферросплавов. – М.: Металлургия, 1990. – 320 с.
6. Панфилов А. А. Процессы выпуска металла и шлака из руднотермических печей // Металлург. – 2018. – № 6. – с. 45–51.
7. Абишев К. А., Сулейменов Е. Н. Современные технологии производства феррохрома. – Алматы: Наука, 2015. – 276 с.
8. Roine A. HSC Chemistry® 9 [Software]. – Outotec, 2014.
9. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. – Release 2022 R2. – Canonsburg: ANSYS, 2022.
10. Panjkov A., Zhang L., Jönsson P. CFD modeling of multiphase flows in metallurgical processes: Challenges and applications // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2022. – Vol. 53B. – p. 1–25.
11. Schoukens A. F. S., et al. Capital and operating cost estimation for ferroalloy projects // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2021. – Vol. 121. – pp. 45–56.
12. Zhang H., Evans G. M. Modelling of slag–metal separation in metallurgical vessels // ISIJ International. – 2019. – Vol. 59, No. 3. – pp. 421–430.
13. Mills K. C. The influence of slag properties on furnace operations // Ironmaking & Steelmaking. – 2016. – Vol. 43, No. 2. – pp. 89–98.
14. Turkdogan E. T. Fundamentals of Steelmaking. – London: The Institute of Materials, 1996. – 331 p.
15. Szekely J., Evans J. W., Sohn H. Y. Gas–Solid Reactions. – New York: Academic Press, 1976. – 400 p.

### References

1. Gasik M. I., Lyakin Yu. D. Teoriya ta tekhnologiya vyrobnystva ferosplaviv. Dnipropetrovsk: NGU Publ., 2009, 463 s.
2. Kazachenok N. M., Timchenko V. V. Gidrodinamika i teploobmen pri vypuske produktov plavki iz pechei. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992, 184 s.
3. Ryss Yu. S. Proizvodstvo ferrosplavov. 7th ed. M: Metallurgiya, 1985, 344 s.

4. Roshchin V. E., Roshchin A. V. Elektrometallurgiya i metallurgiya ferrosplavov. Chelyabinsk: YuUrGU, 2004, 408 s.
5. Kulikov I. S., Patrushev A. A. Teoriya i praktika elektroplavki ferrosplavov. M: Metallurgiya, 1990, - 320 s.
6. Panfilov A. A. Protsessy vypuska metalla i shlaka iz rudnotermicheskikh pechei. // Metallurg - 2018, - № 6, s 45–51.
7. Abishev K. A., Suleimenov E. N. Sovremennye tekhnologii proizvodstva ferrokhroma. Almaty; Nauka, 2015, - 276 s.
8. Roine A. HSC Chemistry® 9. Outotec, 2014.
9. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Release 2022 R2. Canonsburg, ANSYS, 2022.
10. Panjkov A., Zhang L., Jönsson P. CFD modeling of multiphase flows in metallurgical processes: Challenges and applications. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, vol. 53B, p. 1–25.
11. Schoukens A. F. S., et al. Capital and operating cost estimation for ferroalloy projects. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2021, vol. 121, pp. 45–56.
12. Zhang H., Evans G. M. Modelling of slag–metal separation in metallurgical vessels. ISIJ International, 2019, vol. 59, No. 3, pp. 421–430.
13. Mills K. C. The influence of slag properties on furnace operations. Ironmaking & Steelmaking, 2016, vol. 43, No. 2, pp. 89–98.
14. Turkdogan E. T. Fundamentals of Steelmaking. London: Institute of Materials, 1996, 331 p.
15. Szekely J., Evans J. W., Sohn H. Y. Gas–Solid Reactions. New York: Academic Press, 1976, 400 p.

## **ФЕРРОХРОМ ПЕШТЕРІНДЕ БАЛҚЫТУ ӨНІМДЕРІН ШЫҒАРУДЫ CFD-МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ШЛАК МЕН МЕТАЛДЫ БӨЛЕК ШЫҒАРУ ЖҮЙЕСІН ӨНДІРІСТІК АПРОБАЦИЯЛАУ НЕГІЗІНДЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ**

**СЕРІКБАЕВ И.Б.** 

**Серикбаев Ильфат Бекболатович** – №1 цех бастығының орынбасары, Ақтөбе ферроқорытпа зауыты, Ақтөбе к., Қазақстан  
**E-mail:** [ilfat02021990@gmail.com](mailto:ilfat02021990@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-6547-7565>

**Андатпа.** Мақалада жоғары көміртекті феррохром өндіруге арналған пештерде балқыту өнімдерін шығаруды оңтайландыруға бағытталған кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу шлак пен металды бөлек шығару жүйесін өндірістік апробациялау және есептік гидродинамика әдістерін қолдану негізінде жүргізілді. Жұмыстың өзектілігі шлакпен бірге металдың едәуір жоғалуы және шығару процесінің тұрақсыздығы салдарынан ферросплав өндірісінің техникалық-экономикалық көрсеткіштерінің төмендеуімен байланысты. Зерттеу үшдеңгейлі әдістемені қолдану арқылы орындалды, оның құрамына HSC Chemistry бағдарламалық кешенінде термодинамикалық модельдеу, ANSYS Fluent ортасында екіфазалы жүйенің гидродинамикасын CFD-модельдеу, сондай-ақ ұсынылған техникалық шешімдердің технико-экономикалық тиімділігін бағалау кірді. Сандық есептеулер нәтижесінде шығару кезінде шлак пен металл фазаларын тұрақты бөлуге мүмкіндік беретін шығару тесіктерінің оңтайлы геометриялық параметрлері мен өзара орналасуы анықталды. Өзірленген бөлек шығару жүйесі Ақтөбе ферросплав зауытының қолданыстағы агрегатында енгізіліп, өндірістік жағдайда сынақтан өткізілді. Тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтар нәтижесінде шлакпен бірге металл жоғалуы екі еседен астам төмендеп, 4%-дан төмен деңгейге жетті, сондай-ақ кен шикізатынан хромды алу 2,89%-ға артты. Қосымша түрде технологиялық режимнің тұрақтылығының жақсаруы және өнімнің химиялық құрамының ауытқуларының төмендеуі анықталды. Алынған нәтижелер жоғары экономикалық тиімділікті (IRR шамамен 97%, өтелу мерзімі 1,5 жылдан аз) және ұсынылған технологияны басқа ферросплав кәсіпорындарында кеңінен қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** феррохром, шлак пен металды бөлек шығару, CFD-модельдеу, шығаруды оңтайландыру, есептік гидродинамика, металл жоғалуы, ресурсты үнемдейтін технологиялар, өндірістік апробация.

**OPTIMIZATION OF TAP PRODUCTS DISCHARGE IN FERROCHROME FURNACES  
BASED ON CFD MODELING AND INDUSTRIAL TESTING OF A SEPARATE SLAG AND  
METAL TAPPING SYSTEM**

**SERIKBAYEV I.B.** 

**Serikbayev Ilfat Bekbolatovich** – Deputy head of workshop № 1, Aktobe ferroalloy plant, Aktobe, Kazakhstan.

**E-mail:** [ilfat02021990@gmail.com](mailto:ilfat02021990@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-6547-7565>

**Abstract.** The paper presents the results of a comprehensive study aimed at optimizing the discharge of smelting products in furnaces for high-carbon ferrochrome production based on the application of computational fluid dynamics methods and industrial testing of a separate slag and metal tapping system. The relevance of the work is due to the high proportion of metal losses with slag and the instability of the release process, which significantly reduces the technical and economic performance of ferroalloy production. The research was carried out using a three-level methodology including thermodynamic modeling in the HSC Chemistry software package, CFD modeling of two-phase flow hydrodynamics in the ANSYS Fluent environment, and a techno-economic assessment of the proposed technical solutions. Based on numerical simulations, optimal geometric parameters and mutual positioning of tapping holes were determined, ensuring stable separation of slag and metal phases during discharge. The developed separate tapping system was implemented and tested under industrial conditions at an operating unit of the Aktobe Ferroalloy Plant. The results of pilot-industrial trials demonstrated a significant reduction in metal losses with slag by more than two times, to a level below 4%, as well as an increase in chromium recovery from ore by 2.89%. In addition, an improvement in the stability of the technological regime and a decrease in fluctuations of the chemical composition of the product were observed. The obtained results demonstrate a considerable economic effect (IRR approximately 97%, payback period less than 1.5 years) and confirm the feasibility of replicating the proposed technology at other ferroalloy production facilities.

**Key words:** ferrochrome, separate slag and metal tapping, CFD modeling, tapping optimization, computational fluid dynamics, metal losses, resource-saving technologies, industrial testing.