

Б. И. Кудрин, Ю. В. Кошарная

## История решений по созданию ядерно-металлургического комплекса на базе Кольской атомной электростанции

Представлены основания для выбора направлений использования электрической и тепловой энергии Кольской атомной электростанции, расположенной за Полярным кругом. Обозначены регионы страны и их крупные промышленные производства, основу которых составляют металлургические предприятия; электроснабжение данных предприятий осуществляется от Кольской АЭС. Показаны результаты исследования энергозатрат на получение тонны стали и чугуна. Определено, что основным направлением технологического перевооружения в черной металлургии является отказ от использования органического топлива (в частности, в коксодоменном производстве как наиболее энергоемком) и его замена на технологию прямого восстановления железа водородом. В качестве источника энергии, альтернативного органическим топливам, предложено создание бестопливного ядерно-металлургического электрифицированного комплекса (ЯМЭК). Описана принципиальная схема ЯМЭК, в составе которой основной новизной обладает блок подготовки восстановительных газов, дающий потенциальную возможность создания безотходного процесса. Такая технология требует использования высоких температур и решения технических проблем, связанных с теплостойкостью конструкций. Представлены примеры мировых исследований по реализации подобных проектов. Применение новой технологии вызовет необходимость оптимизации структуры электропотребления из-за перераспределения мощности и электропотребления между производствами. Внедрение новой технологии требует также решения ряда задач по электроснабжению и разработке электрооборудования. Отмечено, что на Кольской АЭС в период работы проводилась масштабная реконструкция, которая позволила увеличить ее проектную мощность и продлить срок эксплуатации. На сегодняшний день в регионе имеется избыточная установленная мощность, которая может быть использована для внедрения новой технологии в металлургии.

**Ключевые слова:** ядерно-металлургический комплекс, использование тепла ядерного реактора, распределение энергозатрат, энергосодержание, замена органического топлива, восстановление окатышей водородом.

### Введение

После поездки Л. И. Брежнева в Германию (1978 г.) было развернуто строительство Оскольского электрометаллургического комбината с максимумом нагрузки 3 000 МВт, сниженной Гипромезом после обсуждения до 2 000 МВт, и распределительным напряжением по ОЭМК не на 10 кВ, как обычно, а на 110 кВ с сооружением соответствующих подстанций 110/10 кВ [1]. Питание ОЭМК осуществлялось по двум линиям 330 кВ от Курской АЭС и двум ЛЭП 500 кВ от Воронежской АЭС.

В связи со строительством Кольской АЭС возникла необходимость принять решение по электроснабжению станции, региона и передаче энергии в Ленинград. На очередные Курчатовские чтения Б. И. Кудрина командировали для представления мнения Гипромеза. После обстоятельного обсуждения проблем с академиком В. Легасовым в 1979 г. была организована поездка в Мурманск, затем в Полярные Зори, где состоялось знакомство с АЭС, введенной в 1973–1977 гг. По результатам академик А. П. Александров обратился к Гипромезу с поручением [2] разработать техно-рабочий проект металлургического завода на основе использования тепла ядерного реактора, имеющего тепловую (5 500 МВт) и электрическую (1 760 МВт) мощности. Бригада Гипромеза из семи человек – специалистов генплана, технологов энергетики – была командирована в Полярные Зори, где собрала исходные данные для проектирования.

Техно-рабочий проект начали разрабатывать с 1980 г. Основные трудности заключались в том, что грунт на площадке состоял преимущественно из гранита. Вызывали серьезные трудности образующиеся шлаки и шламы. Проблема сетей и подземной части цехов решалась трудно. Руководил работой академик В. Легасов, которому периодически докладывали об основных технологических решениях, а также решениях по генплану и планировке.

Прервала работы авария на Чернобыле 26 августа 1986 г. Руководство заседанием штаба ученых в Чернобыле возглавил В. Легасов, организовавший собственное расследование. Однако он покончил жизнь самоубийством в 1988 г. К вопросу об ядерно-металлургическом электрифицированном комплексе на Кольском полуострове после этого больше не возвращались.

В Мурманской области и Республике Карелия на северо-западе Российской Федерации ведется промышленное производство никеля, меди, слюды и железного концентрата. Еще в 1960-е гг. стало понятно, что местные предприятия требуют затрат электроэнергии, которую в то время в Заполярье не производили.

Кольская АЭС – первая атомная станция России, построенная за Полярным кругом. Выработка электроэнергии Кольской АЭС составляет около 60 % выработки электроэнергии в Мурманской области. Атомная станция поставляет электроэнергию в энергосистемы "Колэнерго" (Мурманская область) и "Карелэнерго" (Республика Карелия).

## Материалы и методы

Организационно Кольская АЭС разделяется на первую (энергоблоки 1, 2) и вторую (энергоблоки 3, 4) очереди в связи с отличиями в конструкции реакторных установок ВВЭР-440 проекта В-230 (блоки 1, 2) и В-213 (блоки 3, 4).

В 1991–2005 гг. на первой очереди была осуществлена масштабная реконструкция оборудования, что позволило привести ее в соответствие с новыми требованиями правил ядерной безопасности и продлить срок эксплуатации на 15 лет. В 2006 г. введен в действие комплекс по переработке жидких радиоактивных отходов (КП ЖРО). В 2007 г. начаты работы по реконструкции блоков 3 и 4. В 2011 г. получена лицензия Ростехнадзора на эксплуатацию энергоблока 3 в дополнительный период.

В рамках выполнения отраслевой Программы по увеличению выработки электроэнергии на действующих энергоблоках АЭС ОАО «Концерн "Росэнергоатом"» на 2011–2015 гг. на энергоблоке 3 Кольской АЭС закончен этап опытно-промышленной эксплуатации; предпринимаются меры по получению разрешения на промышленную эксплуатацию на уровне мощности 107 % от проектной; энергоблок 4 Кольской АЭС с 2014 г. находится в промышленной эксплуатации на уровне мощности 107 % от проектной.

В настоящее время энергоблоки Кольской АЭС эксплуатируются в режиме диспетчерских ограничений в связи со спадом потребления и ограничением транзита электроэнергии.

Кольская АЭС (КАЭС) является филиалом ОАО «Концерн "Росэнергоатом"», располагается на Кольском полуострове; расстояние до города-спутника (Полярные Зори) 11 км; до областного центра (Мурманск) 170 км.

Таблица 1. Действующие энергоблоки Кольской АЭС  
Table 1. Operating power units of the Kola nuclear power plant

Номер энергоблока	Тип реактора	Установленная мощность, МВт	Дата пуска
1	ВВЭР-440/230	440	29.06.1973
2	ВВЭР-440/230	440	08.12.1974
3	ВВЭР-440/213	440	24.03.1981
4	ВВЭР-440/213	440	11.10.1984
II-1 (план)	ВВЭР-600/498	675	2031–2035

Суммарная установленная мощность КАЭС составляет 1 760 МВт.

Станция состоит из четырех энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-440 и турбинами К-220-44-3 (Харьковский турбинный завод) и генераторами ТВВ-220-2АУЗ (завод "Электросила", Санкт-Петербург).

Связь с энергосистемой осуществляется по пяти линиям электропередачи (ЛЭП):

- КолАЭС – ПС-206 Князегубская ГЭС (330 кВ);
- КолАЭС – ПС-11А, г. Мончегорск (330 кВ);
- КолАЭС – ПС-204 "Титан", г. Апатиты (330 кВ);
- КолАЭС – Каскад Нивских ГЭС (110 кВ);
- КолАЭС – электрокотельная в г. Полярные Зори (110 кВ).

Прорабатывается вариант со строительством ЛЭП на север Финляндии, Швеции, в Норвегию (Печенгский энергомоет).

С 2017 г. начата модернизация первого энергоблока; будут произведены отжиг реактора, замена циркуляционных насосов, ремонт турбин, замена оборудования на новое, доведение блока до постфукусимских требований. После ремонта гарантийный срок эксплуатации будет продлен минимум на 15 лет.

В начале XXI в. Кольская АЭС имела избыточную установленную мощность (около 400–500 МВт) в результате спада потребления после 1991 г. электроэнергии в Мурманской области и Карелии. В связи с этим проблема использования этой мощности для решения задач электроснабжения металлургических производств на сегодняшний день остается актуальной.

Вопросам топливно-энергетических балансов в черной металлургии всегда уделялось большое внимание [3]; в настоящее время анализ выполняется для обоснования отказа от органического топлива и выбора технологического процесса с меньшими энергетическими затратами. В работе [4] исследованы энергозатраты при выплавке 1 т стали для 11 вариантов процесса с колебаниями от 13,4 до 25,7 ГДж/т. На получение 1 т жидкого чугуна с энергосодержанием 9,73 ГДж/т (из которых 1,18 используется в виде физической теплоты в сталеплавильном производстве) затрачивается 14,7 ГДж/т энергии кокса или его заменителей. Учитывая, что с энергетической точки зрения самый энергоемкий процесс – коксодомное производство, которое одновременно является и основным потребителем органического топлива, неизбежна его замена. Важный фактор заключается в том, что коксодомное производство наносит наибольший вред окружающей среде. Речь идет о замене одной из самых древних технологий на технологию прямого восстановления железа, которая и осуществлена на Оскольском электрометаллургическом комбинате.

## Результаты и обсуждение

Упрощенно схема технологического процесса, осуществляемого на ОЭМК, выглядит следующей: рудный концентрат и твердый восстановитель окомковываются и подаются на конвейерную машину для производства металлизированных окатышей. Совместно с металлоломом окатыши попадают в электросталеплавильную печь, в которой выплавляется сталь. Жидкая сталь вакуумируется и разливается на установке непрерывной разливки стали, затем – обычная прокатка. В целом уменьшается количество операций и осуществляется более глубокая и комплексная переработка сырья. Очевидные преимущества дают возможность оценивать резкий рост производства губчатого железа, а оптимисты утверждали, что к 2000 г. доменные печи вообще исчезнут (этого не произошло).

А как замена технологии получения металла отразится на потребности в энергии и в органическом топливе? Из-за различия в конкретной технологии, методах учета, объемах производства и т. д. сведения различны, но основная тенденция одинакова. Общие потребности в энергии для доменных печей и конвертеров при работе на офлюсованных окатышах на 50 % меньше, чем для прямого восстановления и электросталеплавильных печей (восстановление в шахтных печах). Минимально возможные затраты энергии при современном техническом уровне для трех наиболее совершенных технологических схем в абсолютных цифрах составят: 1) доменная печь и кислородный конвертер – 3,67; 2) электросталеплавильный цех, работающий на ломе – 1,37; 3) прямое восстановление и электросталеплавильный цех – 4,80 ГДж/т стали.

Таким образом, на первый взгляд замена процессов не улучшит положение с энергией, а ухудшит его. При получении одинакового количества стали по новой технологии в сравнении с производством на крупном классическом металлургическом предприятии электрические нагрузки возрастут в пять и более раз.

Выходом является создание бестопливного ядерно-металлургического электрифицированного комплекса [1]. Над проблемой ЯМЭК работали специалисты в нашей стране и за рубежом и доказали техническую осуществимость таких комплексов. На пути от классического металлургического комбината к ядерно-металлургическому электрифицированному комплексу строительство Оскольского электрометаллургического комбината является промежуточным шагом. Создание ЯМЭК ведет к фактическому качественному скачку: замене всего органического топлива (уголь + природный газ + нефтепродукты) ядерным топливом.

Перейдем к рассмотрению принципиальной схемы ядерно-металлургического электрифицированного комплекса. Основа ЯМЭК – ядерная энергия, цель – получение высококачественного металла при освоении перспективных металлургических процессов, способ – электрификация всех процессов. Принципиальная схема ЯМЭК: ядерный реактор – ЯР; теплообменные аппараты – ТО; атомная электростанция – АЭС; блок подготовки восстановительных газов – БПВГ; конвейерная машина или шахтная печь; электропечь для легированных сталей или другие устройства для получения высококачественного металла; разливка и прокатка.

Процесс восстановления окатышей на конвейерной машине осуществляется за счет того, что водород пропускают перпендикулярно через слой окатышей, равномерно уложенных в конвейер. Движущаяся лента конвейера с окатышами попадает вначале в зону, где окатыши сушатся, затем в зону нагрева, а уже потом в зону восстановления, куда поступает водород, нагретый до 900°C. После охлаждения получившееся губчатое железо поступает в электросталеплавильные печи.

Принципиально новым блоком ЯМЭК является блок БПВГ, который может быть выполнен или путем электролитического разложения водорода, или с применением плазменного реактора. В последнем случае из двуокиси углерода (углекислого газа)  $\text{CO}_2$  в плазменном реакторе получают окись углерода  $\text{CO}$ , которую отделяют. Затем из окиси углерода, смешанной с парами воды  $\text{H}_2\text{O}$ , в присутствии катализатора получают водород и  $\text{CO}_2$ . Водород направляют на восстановление, двуокись возвращается к началу процесса. Продуктом восстановления водородом окислов железа является вода, которая возвращается в БПВГ. Следовательно, возникает принципиальная возможность создания безотходного процесса.

Ядерный энергетический блок ЯМЭК может быть основан на водо-водяном энергетическом реакторе ВВЭР (типа блока Нововоронежской АЭС), где активная зона помещается в герметическом корпусе из высокопрочной стали, а теплоотвод осуществляется водой под большим давлением или на уран-графитовых реакторах типа РБМК (реактор большой мощности кипящий), где теплоносителем служит кипящая вода (блоки Курской АЭС). Уран-графитовые реакторы канального типа позволяют получать с одного блока 1 000 МВт и более. Есть важный с точки зрения электроснабжения вопрос, заключающийся в том, что АЭС выдают мощность равномерно, а металлургический завод имеет броски мощности, достигающие 60 % и более.

Академик А. П. Александров отмечает [2], что существует еще много нерешенных сложных проблем: создание высокотемпературных надежных теплообменников, пригодных для обогрева водорода, тепловой защиты корпусов из напряженного железобетона, жаростойких систем регулирования и т. д., но принципиально неразрешимых проблем нет. Процесс прямого восстановления окатышей из окисных железных руд водородом, предварительно подогретым в теплообменниках и нагретым до нужной температуры за счет частичного дожигания с кислородом или в плазменных установках, – не конечный этап применения ядерной энергии.

Возможно в едином процессе производить и выплавку стали. Необходимая температура 1 600°C может быть получена путем последующего плазменного догрева водорода.

На каком этапе находятся разработки в настоящее время и какие прогнозы специалистов на будущее? Существуют различные проекты. В ФРГ разработан проект ядерного реактора мощностью 3 000 МВт для газификации угля с гелиевым контуром. Специалисты стран, входящих в европейский ядерно-металлургический клуб, считают, что единичная мощность экономически выгодного для эксплуатации ядерного реактора равна 1 000 МВт, что позволяет произвести 3–10 млн т стали в зависимости от потребления предприятием электроэнергии. В США осуществлено исследование для завода, производящего 15 млн т стали, где ядерное тепло будет использовано для получения водорода из угля. Ожидается, что подобный завод будет сравним с современным предприятием производительностью 4 млн т стали. В Японии решалась проблема строительства опытного металлургического завода с высокотемпературным ядерным реактором мощностью 50 МВт (окончание проекта в 1978 г. и промышленная реализация в 1984 г.).

Изложенные факты применительно к электрификации металлургического предприятия означают коренное изменение сложившихся распределений мощности и электропотребления по различным хозяйствам и производствам. В табл. 2 приведены данные по распределению нагрузки и электропотребления по производствам Западно-Сибирского металлургического завода (технический проект варианта с электросталеплавильным производством), нагрузки по Магнитогорскому металлургическому комбинату (1975 г.), а также по потреблению электроэнергии (средние данные) интегрированного завода, влекущему организацию энергоаудита и необходимость оптимизации структуры электропотребления [5; 6].

Таблица 2. Распределение мощности и электропотребления по хозяйствам и производствам  
Table 2. Power distribution and energy consumption in entities and production divisions

Наименование цеха, производства, хозяйства	Нагрузка, %		Электропотребление, %	
	ММК	ЗСМК	ЗСМК	[1]
Аглоизвестковое с обогащением	14,5	5,2	4,7	–
Доменное	2,0	3,0	23	6,6
Коксохимическое	4,7	4,5	5,0	7,8
Сталеплавильное	2,3	18,7	16,3	5,5
Прокатное	23,4	23,2	24,6	21,5
Энергетическое	36,8	29,7	31,1	50,9
Ремонтное	3,5	5,2	5,4	7,7
Вспомогательные	12,8	10,5	10,6	

В настоящее время расход электроэнергии для завода с классической технологией может быть принят на уровне 500 кВт·ч/т. Дополнительно необходимы затраты электроэнергии: 1) на получение водорода; 2) плазменный перегрев водорода; 3) электротермические процессы (сушка, нагрев); 4) электросталеплавильное производство. Одновременно следует ожидать:

- расход электроэнергии для проката и сохраняющихся служб не уменьшится;
- за счет ликвидации коксодоменного производства несколько уменьшится занимаемая заводом площадь, т. е. возрастут удельные мощности электроэнергии.

### Заключение

При реализации схемы ядерно-металлургического электрифицированного комплекса возникает ряд принципиальных, требующих разрешения проблем: 1) возможность передачи и распределения электроэнергии при выбранных уровнях напряжения; 2) уровни токов короткого замыкания и их ограничения; 3) площади распределительных, преобразовательных и понижающих подстанций; 4) сетевые коридоры; 5) обеспечение аварийных режимов и связь с энергосистемой; 6) проблемы качества электрической энергии при работе сталеплавильных печей, плазменных установок; 7) категорирование и обеспечение надежности потребителей; 8) электромагнитные воздействия [7]. Необходим комплекс работ по электроснабжению и разработке электрооборудования, связанного с внедрением новой технологии.

Рассматривая причины увеличения стоимости системы электроснабжения (кроме указанной причины – неправильного определения нагрузки), выделим две: завышение категорировности электроприемников и влияние качества электроэнергии.

### Библиографический список

1. Кудрин Б. И. О некоторых проблемах исследования электрического хозяйства металлургических предприятий // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Вып. 4. Томск : ТГУ, 1978. С. 7–78.
2. Александров А. П. Атомная энергетика и научно-технический прогресс. М. : Наука, 1978. 271 с.

3. Виленский Н. М., Лац В. М. Топливо-энергетический баланс металлургического завода. М. : Металлургия, 1970. 129 с.
4. Odone G., Palazzi A. J. Consumi energetici nella tabli cazione dell'acciaio // Met. Ital. 1976. N 5. P. 68.
5. Кошарная Ю. В. Разработка методики анализа параметров электропотребления для их нормирования и оценки объемов энергосбережения при проведении энергоаудита предприятий и организаций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : НИУ "МЭИ", 2015. 20 с.
6. Кошарная Ю. В. Оптимизация структуры электропотребления металлургического предприятия для оценки потенциала энергосбережения // Промышленная энергетика. 2016. № 10. С. 22–29.
7. Кудрин Б. И. Через тернии к общей и прикладной ценологии. Основы ценологии, технетики, электрики : антология публикаций и интервью за 2011–1980 гг. // Ценологические исследования. Вып. 57/30. М. : Технетика, 2016. 550 с.

#### References

1. Kudrin B. I. O nekotoryh problemah issledovaniya elektricheskogo hozyaystva metallurgicheskikh predpriyatii [On some problems of research of the electricity sector of metallurgical enterprises] // Elektrifikatsiya metallurgicheskikh predpriyatii Sibiri. Vyp. 4. Tomsk : TGU, 1978. P. 7–78.
2. Aleksandrov A. P. Atomnaya energetika i nauchno-tehnicheskii progress [Atomic energy and scientific and technical progress]. M. : Nauka, 1978. 271 p.
3. Vilenskiy N. M., Lats V. M. Toplivno-energeticheskii balans metallurgicheskogo zavoda [Energy balance of a metallurgical plant]. M. : Metallurgiya, 1970. 129 p.
4. Odone G., Palazzi A. J. Consumi energetici nella tabli cazione dell'acciaio // Met. Ital. 1976. N 5. P. 68.
5. Kosharnaya Yu. V. Razrabotka metodiki analiza parametrov elektropotrebleniya dlya ih normirovaniya i otsenki ob'emov energosberezheniya pri provedenii energoaudita predpriyatii i organizatsiy [Development of methods of analysis of electricity consumption parameters for their valuation and assessment of energy savings in performing energy audit of enterprises and organizations] : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. M. : NIU "MEI", 2015. 20 p.
6. Kosharnaya Yu. V. Optimizatsiya struktury elektropotrebleniya metallurgicheskogo predpriyatii dlya otsenki potentsiala energosberezheniya [Optimization of structure of energy consumption of metallurgical enterprises to assess the energy saving potential] // Promyshlennaya energetika. 2016. N 10. P. 22–29.
7. Kudrin B. I. Cherez ternii k obschey i prikladnoy tsenologii. Osnovy tsenologii, tehnetiki, elektriki [Through thorns to general and applied coenology. Fundamentals of coenology, technetic, electricians] : antologiya publikatsiy i intervyyu za 2011–1980 gg. // Tsenologicheskie issledovaniya. Vyp. 57/30. M. : Tehnetika, 2016. 550 p.

#### Сведения об авторах

**Кудрин Борис Иванович** – ул. Красноказарменная, 14, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук, профессор; e-mail: coenose@rambler.ru

**Kudrin B. I.** – 14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Engineering Institute"; Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: coenose@rambler.ru

**Кошарная Юлия Васильевна** – ул. Красноказарменная, 14, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "МЭИ", канд. техн. наук, доцент; e-mail: kosh\_yulia@mail.ru

**Kosharnaya Yu. V.** – 14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: kosh\_yulia@mail.ru

B. I. Kudrin, Yu. V. Kosharnaya

## **The history of decisions on creation of nuclear and metallurgical complex on the basis of the Kola nuclear power plant**

Some reasons for the choice of directions for using electric and thermal energy of the Kola nuclear power plant located beyond the Arctic Circle have been presented. The regions of the country and their large-scale industrial productions based on metallurgical enterprises have been indicated; the electrical supply of these enterprises is implemented from the Kola NPP. The results of research of energy inputs for the production of a ton of steel and cast iron have been presented. It has been determined that the main direction of technological modernization in the steel industry is avoiding the use of organic fuels (particularly in coke-blast furnace production as the most energy-intensive) and its replacement with the technology of direct reduction of iron with hydrogen. As an alternative energy source for organic fuels the creation of a fuel-free nuclear-metallurgical electrified complex has been proposed. The principal scheme of the fuel-free nuclear-metallurgical electrified complex has been described, here the main novelty has a reducing gases preparation block giving the potential ability for creating waste-free process. It has been noted that this technology requires using high temperatures and solving technical problems related to heat resistance of constructions. Some examples of world research on the implementation of similar projects have been presented. It has been determined that the use of new technology will cause the need for optimization of power consumption structure due to the redistribution of capacity and electrical consumption between productions. The introduction of new technologies requires solving a number of problems on electric power supply and electrical equipment designing. It has been observed that on the Kola NPP large-scale reconstruction was carried out during the working period, it helped to increase its project capacity and extend the operation life. Nowadays the region has excess installed capacity that can be used to introduce new technology in metallurgy.

**Key words:** nuclear and metallurgical complex, using heat from a nuclear reactor, distribution of energy expenditure, energy content, replacement of organic fuels, recovery of pellets with hydrogen.