

**В.И.Большаков, Л.Г.Тубольцев, Г.Н.Голубых**

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Рассмотрены общие принципы анализа риска возникновения аварийных ситуаций в металлургическом производстве, базирующиеся на использовании информации об источниках опасности и количественной оценки риска. Разработаны научно–технические положения и решения по обеспечению продолжительной и безопасной работы металлургических агрегатов доменного и сталеплавильного производства. Показано, что основой промышленной безопасности металлургического предприятия является осуществление мониторинга и контроля технологических, технических и организационных показателей.

**промышленная безопасность, аварийная ситуация, риск, анализ**

**Состояние вопроса.** Опасность является неотъемлемым свойством любого явления, процесса, производства. Несмотря на то, что уровень травматизма и аварийности в металлургическом производстве постоянно снижается, их показатели остаются очень высокими, что подтверждает статистика аварийности и производственного травматизма.

Авария является опасным происшествием на производственном объекте, создающим угрозу жизни и здоровью людей, приводящим к нарушению технологических процессов, разрушению агрегатов, сооружений и зданий, нанесению вреда окружающей среде. Авариям, как правило, предшествуют аварийные ситуации, когда авария еще не произошла, но ее предпосылки налицо, и в ряде случаев еще существует реальная возможность ее предотвратить или уменьшить ее масштабы. Анализ хода развития производственных аварий на металлургическом предприятии показывает, что стадия их зарождения может длиться сутками, а может произойти мгновенно. Установить продолжительность стадии зарождения аварии можно только с помощью регулярной статистики отказов, сбоев в работе оборудования и технологических неполадок, поскольку от этого зависит принятие правильных решений по своевременному предотвращению аварий или максимальному сокращению риска их возникновения, эффективной ликвидации их последствий, а, следовательно, и решений относительно характера формирования и использования кадровых и инвестиционных ресурсов в процессе разработки и осуществления отраслевой политики.

Действенным инструментом исследования безопасности является анализ риска – меры опасности, характеризующей возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий. В последнее время, в связи с разработкой различных методи-

ческих документов по оценке риска улучшилось получение объективной информации об основных опасностях и рисках, связанных с авариями техногенного характера, и о промышленной безопасности опасных производственных объектов – состоянии защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий аварий.

Сегодня процесс управления рисками, оценка рисков возникновения аварийных ситуаций и разработка на их основе мероприятий по снижению и предотвращению нежелательных событий, является актуальной проблемой, применительно к металлургическим предприятиям. Интегрированная система производственной безопасности представляет собой комплекс оценок и мер, включающих охрану труда и промышленную безопасность, направленных на создание и поддержание на металлургическом предприятии единого подхода к безопасности.

**Целью данного исследования** является обобщение существующих подходов к проблеме промышленной безопасности и разработка научно–технические положений и решений по обеспечению безопасной работы металлургических агрегатов доменного и сталеплавильного производства.

Для получения практических результатов и улучшения ситуации с промышленной безопасностью в металлургической отрасли Украины необходимо разработать методологию оценки промышленной безопасности металлургического производства на основе количественной оценки риска. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить анализ риска (качественный и количественный) аварий на опасных производственных объектах металлургического предприятия. Качественный анализ предназначен для выявления причин риска, установления взаимосвязей между рисковыми ситуациями, определения наиболее опасных объектов и размеров убытков от возникновения неблагоприятных ситуаций. Количественный анализ – это определение значений вероятностей наступления неблагоприятных исходов, ущербов от их реализации, ранжирование их по степени значимости, определение допустимых значений риска, исходя из технических и экономических возможностей предприятия. Результаты анализа риска используются при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов; экспертизе промышленной безопасности; обосновании технических решений по обеспечению безопасности и страхованию; оценке воздействия хозяйственной деятельности предприятий на окружающую природную среду и при других процедурах анализа безопасности.

#### **Методические положения промышленной безопасности.**

Анализ риска включает следующие этапы:

- Идентификация опасностей – выявление и четкое описание всех источников опасностей, факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий и особенностей их протекания. При идентификации опасностей следует определить, какие элементы, технические

устройства, технологические агрегаты или процессы в технологической системе требуют более глубокого анализа и какие представляют меньшую опасность.

- Оценка риска – определение вероятности возникновения событий, инициирующих аварийные ситуации на опасном производственном объекте, оценка последствий всех нежелательных событий и обобщение оценок риска. Для определения вероятности (частоты) нежелательных событий используются статистические данные по аварийности в металлургическом производстве, логические методы анализа («дерева событий» и «дерева отказов»), экспертные оценки специалистов.

- Разработка обоснованных технических и организационных мероприятий и рекомендации по уменьшению риска. Приоритетность выполнения рекомендаций определяется совокупностью мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования, путем ранжирования этих мер по показателю «эффективность–затраты» и оценки эффективности предлагаемых мер.

В настоящее время в Украине действует ряд нормативных актов, которые в той или иной степени регламентируют обеспечение промышленной безопасности. Важнейшими среди них являются: Закон Украины «Об охране труда»; Закон Украины «Об объектах повышенной опасности»; Постановление Кабинета Министров Украины от 26 мая 2004 г. № 687 «Об утверждении Порядка проведения осмотра, испытания и экспертного обследования (технической диагностики) машин, механизмов, оборудования повышенной опасности»; Приказ Госназдорхрантруда от 17.06.99 № 112 об утверждении «Положения по разработке планов локализации аварийных ситуаций и аварий»; Концепция и государственная программа обеспечения технологической безопасности в основных отраслях экономики Украины. В дополнение и развитие этих документов Кабинетом Министров Украины Постановлением от 11 июля 2002 г. № 956 в соответствии с Законом Украины «Об объектах повышенной опасности» утверждены «Нормативы пороговых масс опасных веществ для идентификации объектов повышенной опасности». Приказом Министерства труда и социальной политики Украины от 04.12.2002 № 637 утверждена «Методика определения рисков и их приемлемых уровней для декларирования безопасности объектов повышенной опасности». В соответствии с этими нормативами и методикой производится выявление объектов повышенной опасности, которые требуют декларирования и разработки соответствующей документации для повышения степени защиты от аварийных и чрезвычайных ситуаций.

Черная металлургия принадлежит к базовым отраслям народного хозяйства и определяет уровень экономической безопасности Украины [1–3]. Для отрасли характерна концентрация металлургических агрегатов большой мощности, развитая сеть энергетического хозяйства, газопроводов, емкостей для хранения нефти и газовых продуктов, что создает по-

вышенную опасность для обслуживающего персонала, прилегающих производственных и жилых территорий, а также окружающей природной среды. Metallургическое производство связано с высокими энергиями и температурами, в нем присутствуют большие объемы жидкого металла, доменного, коксового и природного газа. Metallургическое производство относится к категории опасных производственных объектов, характеризующихся повышенной опасностью возникновения техногенных аварий и, соответственно, производственного травматизма. Анализ статистических данных показывает, что от общего количества аварий, произошедших в metallургической отрасли, наибольшее число аварий приходится на доменное (25 %), кислородно-конвертерное (14 %) и электросталеплавильное (11 %) производства.

#### **Изложение основных результатов исследования.**

На metallургических предприятиях Украины одним из основных факторов, повышающих риск возникновения аварий на опасных производственных объектах, является высокая степень износа основных производственных фондов на фоне недостаточной инвестиционной и инновационной активности. Старение оборудования значительно опережает темпы технического перевооружения. Около 70 % оборудования metallургических предприятий Украины исчерпало свой ресурс и достигло физического износа. Сверх нормативного срока эксплуатируются более 54 % коксовых батарей, 89 % доменных печей, 87 % мартеновских печей, 26 % конверторов, 90 % прокатных станов. Поэтому приоритетными направлениями развития metallургической отрасли являются: техническое перевооружение; развитие внутреннего рынка; улучшение товарной структуры экспорта; повышение конкурентоспособности metallургической продукции; повышение промышленной безопасности metallургических агрегатов.

Институтом черной металлургии в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» проводятся исследования, направленные на разработку методологических основ оценки технического состояния и обоснования безопасного срока эксплуатации объектов повышенной опасности metallургического производства.

Metallургические предприятия Украины в ближайшее время должны перейти на международную систему безопасности производства с использованием стандартов серии ISO [4]. Мировой опыт показывает, что техническая политика в сфере безопасности производства продукции и безаварийной работы должна эволюционировать. Актуальность проблемы промышленной безопасности регламентирована международным стандартом OHSAS 18001:2007, который разработан в целях создания системы менеджмента профессионального здоровья и безопасности, или системы управления промышленной безопасностью и охраной труда. Поскольку он разрабатывался с учетом структуры стандартов по системам менедж-

мента ISO 9001:2000 (управление качеством продукции) и ISO 14001:2004 (управление окружающей средой), то стандарт OHSAS 18001:2007 (управление безопасностью) необходим для разработки интегрированных систем менеджмента на металлургических предприятиях. OHSAS 18001:2007 определяет опасность, как источник, ситуацию или действие, которые потенциально могут нанести вред человеку или привести к ухудшению здоровья. Мерой опасности является риск, под которым, согласно OHSAS 18001:2007, понимается сочетание вероятности возникновения опасного события или воздействия и серьезности травмы или ухудшение здоровья, которые могли бы быть вызваны таким воздействием. Это опасное событие в OHSAS 18001:2007 называется инцидентом, причем аварийная ситуация является одной из разновидностей инцидента.

Анализ причин возникновения аварийных ситуаций и инцидентов на металлургических агрегатах показывает, что они происходят не только по техническим или технологическим причинам, но и вследствие недостаточно профессиональных действий обслуживающего персонала [5]. Разнообразие причин возникновения таких нежелательных событий требует системного подхода к рассмотрению возможности их предупреждения, т.е. к проблеме промышленной безопасности.

Все звенья технологии производства металлопродукции на металлургическом предприятии рассчитываются на определенную производительность, остановка или выход из строя какого-либо агрегата отражается на работе всего производства в целом. Поэтому в рамках методологии теории гиперкомплексных динамических систем рассмотрим металлургическое производство как многокомпонентную техническую систему [6]. Управление системой осуществляется путем принятия и реализации соответствующего управленческого решения ( $R$ ), определяемого на основании информационного сигнала ( $I$ ), который поступает из материальной составляющей системы ( $Q$ ) на основе анализа технического и технологического состояния системы. Отсутствие любой из составляющих означает невозможность осуществления процесса производства продукции. Исходя из этих представлений, конечный результат работы системы в состоянии  $E_k$  в виде произведенной продукции  $A_k$  представим как функцию трех составляющих:

$$A_k = f(Q_k, I_k, R_k). \quad (1)$$

Состояние системы  $E_k$  характеризуется определенными показателями ( $X_k, Y_k, Z_k$ ) процессов функционирования системы и определенными показателями  $U_k$  воздействия внешней среды и факторов риска:

$$E_k = \{(X_k \in X), (Y_k \in Y), (Z_k \in Z), (U_k \in U)\}, \quad (2)$$

где  $X$  – множество технических параметров;  $Y$  – множество технических параметров;  $Z$  – множество организационных и управляющих параметров;  $U$  – множество параметров внешней среды и риска.

Для того, чтобы поддерживать систему в определенном требуемом состоянии  $E_k$ , необходимо принимать и реализовывать соответствующие управленческие решения, которые определяются поступающими от системы информационными сигналами, т.е.  $R$  является функцией  $I$ :

$$R = F(I). \quad (3)$$

При использовании такого подхода возникает возможность совершенствования показателей, обеспечивающих достаточный уровень информации для принятия оптимальных управленческих решений. Значения различных информационных сигналов  $a_i$  через определенные промежутки времени  $\Delta t$  дают разницу информационного сигнала  $\Delta a_i$ , что является информацией о необходимости принятия того или иного управленческого решения  $R_i$ , т.е.:

$$I = \sum (a_1 - a_0)_i = \sum \Delta a_i. \quad (4)$$

Значение информационного сигнала  $\Delta a_i$  показывает уровень опасности для промышленной системы и свидетельствует о степени вероятности появления новых информационных сигналов и переходе промышленной системы на новый уровень риска возникновения аварийных ситуаций. Каждому значению информационного сигнала должно соответствовать конкретное управляющее действие, которое можно реализовать при наличии системы управления промышленной безопасностью, в которую поступают информационные сигналы от персонала при обследовании производственных объектов; от датчиков и приборов, фиксирующих технологические показатели и техническое состояние оборудования; из административных источников.

Нормальное функционирование многокомпонентной системы, какой является и металлургическое предприятие, требует создания и четкого выполнения требований промышленной безопасности к эксплуатации опасных производственных объектов на предприятии, включающей систему мониторинга и диагностирования оборудования, показания контрольно-измерительных приборов, систему автоматизированного контроля и управления технологическими процессами, а также последующего реагирования на возникновение нежелательных событий и ликвидацию их последствий. Всесторонне оценить состояние системы, в том числе, и системы промышленной безопасности металлургического предприятия, можно с помощью концептуальных и математических моделей [6]. В современных условиях хозяйствования должна быть реализована концепция управления безопасностью промышленных объектов, предусматривающая иерархический многоуровневый мониторинг и контроль технологических, технических и организационных показателей. Процесс создания системы управления промышленной безопасностью металлургического предприятия должен включать: разработку технической политики, установление целей и ключевых вопросов, определение необходимости и достаточности используемых информационных показателей производства

для обеспечения промышленной безопасности [7]. При этом наиболее важными факторами являются целевые установки и стремление производственного персонала к совершенствованию производственного процесса, выработке умения реагировать на сигналы показателей, определяющих безопасность металлургического производства, учитывая, что качество и безопасность производства продукции тесно связаны между собой.

Для оценки риска возникновения аварийных ситуаций и инцидентов, возможных отказов оборудования, нарушений технологий или недостатков в организационной работе на металлургическом предприятии, применяются методы теории вероятностей. Использование вероятностных методов при прогнозировании аварийности в металлургическом производстве, которые базируются на статистических данных, позволяют дать количественную оценку степени случайности появления аварийных ситуаций и инцидентов при эксплуатации оборудования [8, 9]. Производство металлопродукции осуществляется по цепочке последовательно расположенных агрегатов непрерывного и периодического действия, технологически связанных между собой. Бесперебойный выпуск продукции требует слаженной и безопасной работы всех цехов и подразделений металлургического предприятия. Выбор приоритетных технологических, организационных, технических и экономических решений по обеспечению промышленной безопасности предприятия осуществляется на основе оценки риска возникновения аварийных ситуаций и инцидентов на каждом технологическом переделе. Наиболее распространенным подходом при количественной оценке риска [10] является использование выражения:

$$R = \sum_i^n P_i \cdot Y_i, \quad (5)$$

где  $P_i$  – вероятность возникновения аварийной ситуации на  $i$ -том оборудовании;  $Y_i$  – ущерб от возникновения аварийной ситуации на  $i$ -том оборудовании;  $n$  – количество оборудования технологического процесса.

Предлагаемая методика расчета риска на металлургическом предприятии основана на использовании теории массового обслуживания. Для этого процесс возникновения и ликвидации аварийных ситуаций представлен как система массового обслуживания, требованиями в которой будут являться заявки на ликвидацию аварийных ситуаций, а временем обслуживания – время их ликвидации. Проведение оценки возможных состояний работы оборудования по переделам металлургического производства позволило составить дифференциальные уравнения [11] и вывести выражение для определения вероятности возникновения аварийных ситуаций:

$$P_i = 1 - \frac{1}{\sum_{k=0}^{R_i} \frac{\rho_i^k}{k!} + \frac{\rho_i^{R_i+1}}{R_i!(R_i - \rho_i)}}, \quad (6)$$

где  $R_i$  – количество однотипных агрегатов рассматриваемого передела металлургического производства;  $\rho_i = \lambda_i t_i$ ;  $\lambda_i$  – плотность потока аварийных ситуаций в год;  $t_i$  – время ликвидации аварийной ситуации, год;

$\lambda_i = \frac{n_i}{t_{раб\ i}}$ ;  $n_i$  – количество аварийных ситуаций на  $i$ -том оборудовании

за рассматриваемый промежуток времени его работы;  $t_{раб\ i}$  – фактическое время работы  $i$ -того оборудования за рассматриваемый промежуток вре-

мени, год;  $t_i = \frac{t_{\text{общ}}}{n_i}$ ;  $t_{\text{общ}}$  – общее время ликвидации аварийных си-

туаций рассматриваемого передела.

Практическая значимость полученного результата заключается в возможности прогнозирования аварийных ситуаций и инцидентов в металлургическом производстве за определенные промежутки времени, что позволит принять своевременные меры по их предупреждению.

Учитывая производственные ущербы от аварий и инцидентов, на основании выражений (6) и (5) можно оценить риск возникновения аварийных ситуаций на оборудовании металлургического производства. Предлагаемая методика позволяет оценить текущий и приемлемый уровень рисков, разработать мероприятия по повышению состояния промышленной безопасности, определить приоритетные направления инвестирования средств для повышения устойчивости функционирования металлургического предприятия и эффективности производства металлопродукции. Исходя из наиболее весомых причин возникновения аварийных ситуаций и целесообразности затрат по их уменьшению, необходима корректировка существующей системы управления рисками на предприятии путем проведения объективной идентификации опасностей и причин их возникновения. На основе полученных значений рисков в металлургическом производстве предлагается внедрение современных методик профессионального отбора и программ обучения для обслуживающего персонала с целью выработки навыков безопасной и эффективной работы, а также реагирования на внештатные производственные ситуации.

Расчет количественных показателей риска аварийных ситуаций и инцидентов в доменном производстве, основанный на статистических данных об аварийности, выявил, что наибольшие значения приходятся на этапы выплавки чугуна в доменной печи и выпуск продуктов доменной



плавки. Расчет вероятности возникновения инцидентов на оборудовании кислородно–конвертерного производства показал, что инциденты с наибольшей вероятностью возникают при использовании в технологии всего комплекса оборудования кислородно–конвертерного производства (агрегатов доводки стали, агрегата «печь–ковш», комбинированной установки вакуумирования стали), и с наименьшей – при внепечной обработке стали только агрегатами доводки стали, а также подтверждает ранжирование оборудования по степени потенциальной опасности, основанное на методе экспертных оценок, согласно которому наиболее аварийными являются: кислородные конвертеры, участки внепечной обработки стали, машины непрерывного литья заготовок. Полученные результаты позволяют определить приоритетные направления в разработке организационно–технических и технологических мер по снижению и прогнозированию уровня риска аварий на металлургическом предприятии.

Используя представленные выше теоретические положения, Институт черной металлургии НАН Украины выполняет исследования, направленные на разработку научно–технических положений и технических решений по обеспечению продолжительной и безопасной работы металлургических агрегатов доменного и сталеплавильного производств, а также оборудования для производства высокопрочных железнодорожных колес.

Доменное производство металлургических предприятий относится к категории опасных производственных объектов, поскольку на этом производстве используются, образуются, транспортируются газы и горючие вещества; применяются грузоподъемные механизмы, конвейеры, эстакады; получают расплавы черных металлов. Основными причинами возникновения аварийных ситуаций в доменном производстве являются: нарушение технологического режима работы оборудования и агрегатов, недостаточный уровень профессиональных знаний персонала и организации производства, нарушение технологических инструкций, неудовлетворительный контроль технологического процесса, нарушение регламента ревизии технических устройств, некачественный ремонт и наладка оборудования. Аварии на опасных производственных объектах металлургического предприятия происходят не только по вине проектировщиков, строителей, ремонтников или технического персонала, но и из–за отсутствия должного контроля технологических процессов, происходящих в агрегатах. Доменная печь является высокотемпературным агрегатом, производящим чугун, а также потребляющим и вырабатывающим газообразное топливо, способных в определенных условиях взрываться, вызывать пожары и отравления персонала. Достаточно привести примеры взрывов доменных печей, явления сравнительно редкого, но резонансного, так как оно обычно сопровождается человеческими жертвами. Доменщики со стажем помнят взрыв доменной печи №7 Днепровского металлургического комбината (Украина) во время ее раздувки в 1993 г., в результате которого погибло более 20 человек. В среднем ежегодно в мире взрывается

одна доменная печь. Статистика взрывов доменных печей с начала XXI века такова [12]: 2001 г. – взрыв доменной печи на сталеплавильном заводе компании «Корус» в г. Порт Тальбот в Великобритании (14 человек госпитализированы, один из них скончался); 2003 г. – взрыв доменной печи на заводе «Вишвешварая» в г. Бхадравати в Индии (погибло 7 человек); 2005 г. – взрыв доменной печи на сталелитейном заводе в г. Капфенберг в Австрии (3 погибших); 2006 г. – на металлургическом комбинате «Гофэн» в г. Таншань (Китай) взорвалась доменная печь (6 человек погибло); 2008 г. – авария на выдувке печи D, Burns Harbog (США). К счастью, никто не пострадал (рис.1). Взрывы доменных печей произошли в разных частях света, в том числе на металлургических предприятиях Австрии, Великобритании и США, известных высоким уровнем технологии. Это свидетельствует о том, что доменная плавка сегодня остается одной из наиболее опасных современных технологий.



Рис.1. Авария на выдувке доменной печи D, Burns Harbog (США) в 2008 г.

Анализ риска аварий в доменном производстве является частью системы управления промышленной безопасностью металлургического предприятия и предусматривает использование всей доступной информации для идентификации опасностей возможных нежелательных событий. В доменном производстве к наиболее вероятным событиям, инициирующим возникновение аварийных ситуаций и инцидентов, относятся: прогары горна и лещади с выходом чугуна; прогары рам и холодильников чугунных леток; неполадки на выпусках чугуна; прогары и вынос фурменных устройств с выбросом материалов; заливка фурменных устройств;

прогары фурм и неисправности элементов фурменных устройств; прогары и разрывы кожухов шахты и заплечиков с выбросом материалов; разрывы и трещины кожухов печей; выход из строя холодильников; неисправности загрузочных устройств; неисправности в тракте транспортировки доменного газа; неисправности трактов холодного и горячего дутья; выход из строя клапанов горячего дутья; неисправности в системах энерго– пароводоснабжения и др.

В последние десятилетия все большее внимание уделяется продлению кампании доменных печей за счет применения различных технических, организационных и технологических мероприятий. Наряду с требованиями обеспечения качества продукции и высокой производительности неперемным условием является обеспечение эксплуатационной безопасности и технологической устойчивости работы доменных печей в стационарных и переходных режимах работы.

Опыт эксплуатации доменных печей в стационарных режимах показывает, что продолжительность их кампании определяется: сырьевыми условиями плавки; рациональностью технологии; интенсивностью плавки; наличием современных средств контроля доменного процесса; эффективностью используемых систем охлаждения; качеством огнеупоров, используемых для футеровки печи; рациональностью параметров проектного профиля; техникой и технологией выпуска продуктов плавки; производительностью, продолжительностью и частотой простоев печи; техническим состоянием несущих конструкций и основного технологического оборудования.

Износ футеровки горна и лещади служит одним из главных критериев ограничения продолжительности кампании печи. Рабочая поверхность футеровки металлоприемника подвергается термическому напряжению; проникновению чугуна, цинка, щелочей в кладку печи и эрозии потоком жидких продуктов плавки. Несовершенная техника выпуска продуктов плавки; использование некачественных шихтовых материалов также оказывают негативное влияние на состояние футеровки. Воздействие чугуна и шлака на футеровку металлоприемника активизируется при неудовлетворительном состоянии его дренажной способности, периферийном ходе печи, при повышенной интенсивности доменной плавки. В значительной степени отрицательное воздействие на состояние футеровки оказывают эрозионные явления. Практика эксплуатации доменных печей показывает, что наиболее щадящие условия службы их футеровки обеспечиваются при соблюдении ровного и устойчивого хода печи, рационального теплового и шлакового режимов плавки и надежной работы системы охлаждения.

В качестве примера рассмотрим один из возможных сценариев («древо событий») возникновения и развития аварийной ситуации на доменной печи: нестабильный ход доменной печи → периферийный ход печи → сход гарнисажа → эрозия и разрушение футеровки доменной печи →

теплофизическое воздействие на холодильники и выход их из строя → появление необратимых пластических деформаций кожуха, трещины кожуха шахты → разрыв кожуха → выброс расплава и твердых раскаленных материалов из доменной печи → разрушение конструкции печи и оборудования литейного двора (рис.2).

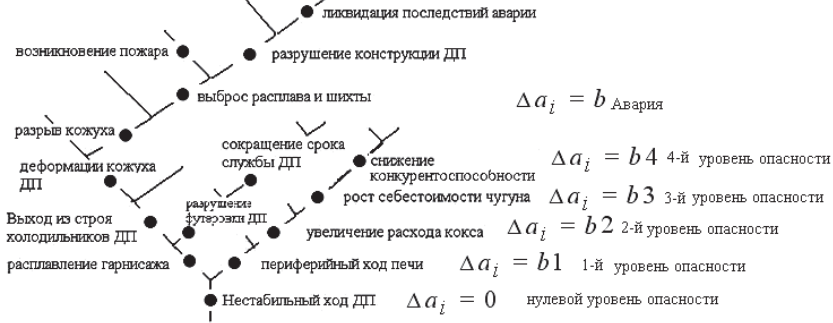


Рис.2. Сценарии развития аварийной ситуации на доменной печи.

Для предотвращения износа футеровки металлоприемника необходимо, помимо контроля температуры кладки, тепловых нагрузок в системе периферийного охлаждения и температуры жидких продуктов плавки контролировать содержание углерода в чугуна. С помощью разработанных автоматизированных систем контролируется степень насыщения чугуна углеродом, что позволяет своевременно уменьшать агрессивность чугуна посредством повышения теплового потенциала металлоприемника.

С целью своевременного определения необходимости проведения текущих и капитальных ремонтов доменных печей разработан метод контроля состояния кладки горна и лещади по температурному полю и тепловому потоку. Информация о состоянии системы периферийного охлаждения и остаточной толщине футеровки горна и лещади для обслуживающего персонала печи представляется в виде видеок кадров на экране компьютера.

Важным фактором, определяющим стойкость футеровки шахты печи, является режим загрузки. Результаты исследований распределения шихтовых материалов перед задувками и в процессе эксплуатации доменных печей позволили сформулировать ряд дополнительных, принципиально новых, технологических положений по выбору рациональных режимов загрузки печей. Использование этих разработок позволяет увеличить стойкость футеровки шахт доменных печей за счет ограничения содержания оксида железа в первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавах пристенной зоны не выше 15–20 %. Для реализации этих технологических положений содержание низкоосновных окатышей в шихте, выгружаемой в периферийную зону, не должно превышать 6,5–7,0 %. Кроме

того, повышение стойкости футеровки достигается ограничением интенсивности периферийного потока газа в сочетании с выбором железосодержащей смеси из агломерата и окатышей, соответствующих температурно-тепловым условиям периферийной зоны [13].

При выдувке и задувке доменной печи многократно возрастает опасность потери контроля и управления сложными, не всегда предсказуемыми процессами, протекающими в печи, следствием которых могут быть не только дополнительные энергетические и экономические затраты, но и производственные аварии. При выдувках и задувках необходимо не допустить образования взрывоопасной газо-воздушной смеси, поддерживать ровный ход печи для предотвращения обрывов шихты и опасности возникновения взрывов. Правильное сочетание дутьевого режима с контролем уровня поверхности засыпи шихтовых материалов в печи, измеряемом на всем протяжении выдувки, необходимо для ее безопасного ведения. От тщательного выполнения задувки в значительной мере зависит продолжительность кампании печи, ее безаварийная и высокопроизводительная работа, получение расчетных по составу и свойствам продуктов плавки. При загрузке задувочной шихты необходимо предотвратить повреждение футеровки шахты потоком шихтовых материалов и обеспечить формирование устойчивого осевого газового потока, благоприятных условий гарнисажеобразования в начале работы печи.

Остановка доменных печей на капитальные ремонты I, II и III разрядов определяется их эксплуатационным состоянием. Основной причиной остановок печей на капитальные ремонты I и II разрядов является износ футеровки горна, лещади, заплечиков, распара, шахты и колошника. Для проведения капитальных ремонтов I и II разрядов необходима выдувка печи, при которой рабочее пространство печи освобождается от шихтовых материалов путем их проплавки, газификации и последующего дожигания оставшегося кокса при подаче воздуха через фурмы, без загрузки новых порций шихты. Разрешение на начало опускания уровня засыпи для выполнения капитального ремонта дается только при условии технологически достаточно высокого теплового состояния печи, ровного, устойчивого ее хода, соблюдении графика выпуска продуктов плавки и физическом нагреве чугуна до 1450–1500 °С. Режимы дутья и загрузки шихтовых материалов должны обеспечивать плавное опускание шихты, а температура газов на колошнике не должна превышать 500 °С. В период выдувки возникают большие и резкие колебания давления газов в печи. Особенно опасное положение возникает в газовой системе при подвисяниях, осадках и обрывах шихты. Для непрерывного контроля положения опускающейся поверхности шихты, прогноза подвисяний и обрывов шихты, корректировки дутьевых параметров и режима загрузки рекомендуется применение радиолокационных измерителей дальности.

Основные технологические положения рациональных приемов задувки печей большого и среднего объемов являются основополагающими для

всех вариантов задувок, отличающихся интенсивностью задувки, раздувки и структурой дутья. Одной из главных задач при задувке является обеспечение интенсивного наращивания газодинамических параметров при сохранении технологии устойчивого развития процессов плавки. Успех пускового периода определяется рядом основных технологических положений, которые сформулированы на основании анализа задувок печей разного объема. Для обеспечения эффективной ускоренной задувки доменной печи рекомендуется проводить предпусковые испытания оборудования систем контроля и управления загрузкой и исследования распределения шихты на колошнике, которые позволяют существенно сократить продолжительность задувки и раздувки печи, обеспечить стабильную работу системы загрузки и уменьшить расход энергоресурсов.

При определении состава задувочной шихты необходимо исходить из того, что она должна обеспечить не только получение чугуна и шлака заданных составов и свойств, но и обеспечить теплотребность процессов плавки, компенсировать теплотраты на нагрев шихты, футеровки, кожуха печи. Программа загрузки печи задувочной шихтой должна включать: меры по защите футеровки лещади и всего профиля печи при загрузке материалов в печь; порядок размещения задувочных шихт по высоте; рациональные режимы загрузки и распределения шихтовых материалов, а также обеспечить рациональное соотношение газопроницаемости и развития центрального и периферийного газовых потоков для активизации восстановительно-тепловых процессов. При загрузке шихтовых материалов в печь уровень и профиль поверхности засыпи рекомендуется контролировать с помощью радиолокационных датчиков [14].

На основании обобщения опыта участия Института черной металлургии в проведении задувок и выдувок доменных печей Украины и стран СНГ в 1970–2009 гг., ИЧМ разработаны и реализованы новые приемы и технические мероприятия по обеспечению промышленной безопасности доменных печей при их остановках на капитальные ремонты или вынужденную непродолжительную консервацию, а также эффективной и безопасной задувки:

- использование технологии восстановления футеровки торкретированием в сочетании с эффективной системой охлаждения;
- применение радиолокационного уровнемера, обеспечивающего непрерывный, контроль уровня шихты;
- контроль устойчивости схода шихты и установления окончания выдувки по характеру изменения диаграмм  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  в колошниковом газе;
- рекомендуется при выдувке поддерживать теоретическую температуру горения на уровне 2150–2300 °С;
- во время выдувки орошение шихты водой струйным способом и душированием, подача азота через фурмы, в шахту и на колошник;

- рекомендуется при остановке печи на капитальный ремонт 2–го разряда обеспечивать выпуск «козлового» чугуна;
- впервые выполнен расчет и контроль траекторий движения потока шихтовых материалов по всей высоте печи во время загрузки для предупреждения повреждения футеровки от ударов и истирания;
- рекомендованы режимы загрузки и распределения шихтовых материалов, рациональные параметры формирования профиля засыпи;
- разработаны и опробованы технологические мероприятия по предупреждению образования «настылей» в доменной печи.

Опробование разработанных технологических и организационно–технических положений по безаварийной выдувке и задувке доменных печей при капитальных ремонтах и остановках крупнейшей в Украине доменной печи №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», показало высокую эффективность и перспективность их применения на доменных печах большого и среднего объема. В результате проведенных Институтом черной металлургии исследований, разработаны основные положения технологического регламента безопасной выдувки и задувки доменных печей большого и среднего объема, рекомендованные Объединением предприятий «Металлургпром» и Ассоциацией «Центр подготовки сырья и выплавки чугуна» для использования в «Типовой технологической инструкции отрасли» и технологических инструкциях по задувке и выдувке для конкретных условий эксплуатации доменных печей металлургических предприятий Украины [14].

Обеспечение промышленной безопасности сталеплавильного производства является неотъемлемым требованием конкурентоспособности металлопродукции в современных условиях и во многом зависит от выбора системы управления рисками, которая предусматривает: наличие информации о произошедших аварийных ситуациях и причинах их возникновения; проведение мониторинга технического состояния оборудования; оценку риска возникновения аварийных ситуаций для выбора мер по их уменьшению.

Задача по уменьшению риска аварийности в кислородно–конвертерном производстве является актуальной для металлургических предприятий. Для ее решения необходимо разработать рекомендации, направленные на повышение безопасности эксплуатации кислородных конвертеров при различных технологических вариантах производства стали. Процесс производства стали в конвертерах с продувкой ванны кислородом связан с образованием большого количества конвертерных газов, которые содержат мелкодисперсную конвертерную пыль и токсичные газы (CO, SO<sub>2</sub>). Кислородные конвертеры являются потенциально опасными источниками аварийных ситуаций, главной особенностью которых является наличие расплавленного металла, шлака и горючих газов. Основными причинами возникновения аварий являются: износ футеровки конвертера; конвертерные газы; взрывы и выбросы металла.

Конвертерное производство, по сравнению с мартеновским, характеризуется лучшими условиями труда и меньшим загрязнением окружающей природной среды. Используемые в Украине технологические схемы выплавки стали в конвертерах по техническому уровню отстают от лучших зарубежных аналогов, а использование малоэффективных систем газоочисток приводит к значительным выбросам вредных веществ в атмосферу.

Количество, температура и химический состав конвертерных газов изменяется при продувке в зависимости от расхода кислородного дутья, состава чугуна и лома, состава шихты и извести, высоты фурмы над уровнем ванны. Максимальное количество газов, отходящих от одного конвертера, составляет  $300000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Температура дымовых газов на выходе из горловины конвертера в течение плавки повышается от  $1250\text{--}1300 \text{ }^\circ\text{C}$  в начале продувки, до  $1600\text{--}1700 \text{ }^\circ\text{C}$  в середине и конце продувки. Основными компонентами конвертерных газов являются CO и  $\text{CO}_2$ , объемное содержание которых составляет соответственно  $60\text{--}85 \%$  и  $10\text{--}20 \%$ . В отходящих газах в незначительном количестве могут присутствовать  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , Ar. Содержание диоксида серы в газах составляет до  $300 \text{ мг/м}^3$ . [15].

Кислородно-конвертерный процесс производства стали включает: загрузку в конвертер металлического лома; продувку металла и заливку жидкого чугуна; отбор пробы и ее анализ; продолжение продувки кислородом жидкого металла до требуемого химического состава; выпуск плавки в ковш. Указанные технологические операции сопровождаются выделением вредных выбросов в виде пыли, аэрозолей и токсических соединений (или элементов) в следующих объемах: при заливке чугуна в конвертер –  $208\text{--}342 \text{ г/т}$  стали; при продувке –  $13000\text{--}22000 \text{ г/т}$  стали; при выпуске плавки из конвертера –  $161\text{--}507 \text{ г/т}$  стали. Пыль состоит в основном из окислов железа, окислов кремния, алюминия, кальция, магния, марганца. Основная масса частиц пыли (до  $80 \%$ ) имеет размеры менее  $1 \text{ мкм}$ ; плотность пыли  $4\text{--}5 \text{ г/см}^3$ . Сильная запыленность конвертерного газа требует применения средств удаления пыли и газоочистки. Современные конвертеры оснащены системами отвода газа, обеспечивающими полное или частичное дожигание оксида углерода до  $\text{CO}_2$ .

Проведенный анализ причин аварий, произошедших в последнее время на ряде кислородных конвертеров показывает, что наиболее опасным участком кислородно-конвертерного производства является конвертер –  $20,3 \%$  от всех аварийных ситуаций, причем на ванну расплавленного металла приходится  $70 \%$  случаев, а на газоотводящий тракт  $21 \%$ . Отсутствие должного контроля работы и состояния газоотводящих трактов приводит к хлопкам, взрывам и даже разрушению целых их участков.

При эксплуатации кислородных конвертеров особое внимание уделяется безопасности работы газоотводящего тракта, которая связана с химическим составом отходящего газа. В условиях экспериментального кон-



вертера емкостью 1,5 т в Институте черной металлургии НАН Украины проведены исследования различных вариантов кислородно–конвертерного процесса в зависимости от способа подачи в конвертер кислорода и других технологических газов: продувка кислородом сверху (в глуходонном конвертере); продувка кислородом снизу (через донные фурмы в оболочке защитной среды); комбинированная продувка, которая разделяется на продувку кислородом сверху и нейтральным газом через донные фурмы и продувку кислородом сверху и через донные фурмы.

Выполнен анализ динамики изменения химического состава отходящего газа по видам кислородно–конвертерного процесса, в ходе которого осуществлялся контроль химического состава газа. Видовые различия проявляются и в запыленности газов. Наибольшая запыленность соответствует продувке кислородом сверху, самая низкая – продувке снизу, среднее значение – комбинированной продувке. Установлено, что для каждого вида кислородно–конвертерного процесса на химический состав отходящего газа основное влияние оказывают: конструкция верхнего дутьевого устройства и использование теплоносителей. Конструктивные особенности верхних фурм влияют на дожигание газа. Наличие водорода в отходящем газе, а также использование угольного топлива приводит к увеличению взрывоопасности газа. Таким образом, обеспечение безопасной работы кислородных конвертеров требует проведения оптимизации задач использования и утилизации отходящих газов.

На состояние промышленной безопасности кислородно–конвертерного производства негативно влияют: физический износ основного технологического оборудования; несвоевременное и некачественное проведение капитального и текущего ремонта оборудования, зданий и сооружений; эксплуатация оборудования с отработанным нормативным сроком; применение несовершенных технологий производства стали; сокращение численности квалифицированных специалистов и производственного персонала; снижение качества профессиональной подготовки производственного и ремонтного персонала. Выявлены основные причины несчастных случаев: неудовлетворительная организация и проведение ремонтных работ (66,6 %), неудовлетворительное техническое состояние оборудования (16,7 %), конструктивные недостатки оборудования (16,7 %). Основные причины групповых несчастных случаев – нарушение технологии при ведении металлургических процессов (50 %), неудовлетворительная организация и проведение ремонтных работ (50 %).

Наиболее значительные по частоте случаев и удельному весу аварийные потери производства происходят при выпуске и разливке стали. Аварии при выплавке стали отличаются более существенными потерями производства в среднем на один случай. Наиболее значительными по частоте случаев и причиненному ущербу являются аварии на газоочистке в связи с выходом из строя дымососа, прогарам труб газоходов и др. Из технологических аварий наиболее значительными являются взрывы в конвертере, связанные с попа-

данием воды в конвертер из-за течи фурм и кессона. При разливке стали аварийные ситуации и инциденты чаще всего происходят в результате прогара футеровки ковша и устройств для выпуска стали из ковша (таблица).

Таблица. Причины аварий в кислородно-конвертерном производстве.

Вид аварии	Частота случаев, %	Удельный вес в аварийных потерях, %	Аварийные потери пр-ва, т/случай
Разрушение футеровки горловины	1,9	1,2	2000
Прогар футеровки корпуса	5,2	6,8	4200
Прогар стыка корпуса и днища	5,2	2,5	1600
Взрыв при выплавке стали	5,2	13,1	8100
Выбросы при выплавке стали	3,9	3,1	2600
Прогар кислородной фурмы	1,9	1,5	2500
Прогар футеровки ковша	7,8	8,9	3700
Прогар стакана, шибера, стопора	9,0	9,3	3300
Выбросы из ковша	9,2	1,6	1500
Прогар шлаковой чаши	0,6	0,2	1700
Разрушение металлоконструкций	1,9	5,9	5200
Поломки мехоборудования	6,4	15,5	7700
Поломки электрооборудования	5,8	5,5	3000
Водоснабжение	14,6	8,1	1800
Газоочистка	23,2	16,8	2300

При эксплуатации опасных производственных объектов кислородно-конвертерного производства должны внедряться комплексные системы управления промышленной безопасностью, обеспечивающие выполнение требований промышленной безопасности и мониторинг технического состояния оборудования, разработку организационных и технических мероприятий, направленных на уменьшение риска возникновения аварий и включающие: мероприятия по модернизации и реконструкции оборудования; новые технические решения и технологии; инновационные разработки для энергосбережения, переработки отходов производства и повышения его экологической безопасности; производственный контроль соблюдения требований промышленной безопасности; экспертизу промышленной и экологической безопасности; страхование ответственности за причинение вреда при эксплуатации опасных производственных объектов; мероприятия по предупреждению и ликвидации аварийных ситуаций; методические рекомендации по оценке риска возникновения аварийных ситуаций.

Используя теоретические положения и нормативные принципы промышленной безопасности опасных производственных объектов Институтом черной металлургии НАН Украины проводятся исследования, направленные на: создание методологических основ оценки технического состояния и обоснования безопасного срока эксплуатации объектов повышенной опасности металлургического производства; анализ опасности и оценку уровня риска возникновения аварийных ситуаций, разработку мероприятий по снижению и предотвращению нежелательных событий применительно к металлургическим агрегатам и оборудованию; разработку научно-технических положений и технических решений по обеспечению продолжительной и безопасной работы металлургических агрегатов доменного и сталеплавильного производств.

1. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г.* Проблемы научно-технического обеспечения Программы развития черной металлургии Украины // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 6. – С. 3–6.
2. *Долженков Ф.Е.* Черная металлургия Украины: какой ей быть? // Сталь. – 1999. – № 2. – С. 80–84.
3. *Большаков В.И., Кривченко Ю.С., Тубольцев Л.Г.* Задачи и особенности реализации в черной металлургии перспективных технологических процессов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 3. – С. 3–8.
4. *О состоянии и перспективах развития металлургического комплекса Украины / С.Г. Грищенко, В.К. Грановский, В.С. Харахулах, С.С. Бродский // Литье и металлургия. – 2002. – № 4. – С. 118–121.*
5. *Плискановский С.Т., Полтавец В.В.* Неполадки в работе доменных печей. – Днепропетровск: Пороги. – 2002. – 301 с.
6. *Малюта А.Н.* Закономерности системного развития. – Киев: Наукова думка. – 1990. – 136 с.
7. *Хенли Э.Дж., Кумато Х.* Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение. – 1984. – 445 с.
8. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука. – 1969. – 576 с.
9. *Гребеник В.М., Цапко В.К.* Надежность металлургического оборудования. – М.: Металлургия. – 1989. – 592 с.
10. *Тэйман Л.Н.* Риски в экономике. – М.: Юнити–Дана. – 2002. – 380 с.
11. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука. – 1966. – 432 с.
12. *Русских В.П., Томаш А.А., Тарасов В.П., Хрущев Е.И.* Взрывы газов в доменном производстве. – Мариуполь: ПГТУ. – 2006. – 99 с.
13. *Научно-технические решения по обеспечению продолжительной безопасной работы доменных печей / В.И.Большаков, Н.Г.Иванча, А.С.Нестеров, Н.М.Можаренко, Г.В.Панчоха, Д.Н.Тогобицкая // Сб. научн. тр. ИЭС «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – 2006. – Киев: ИЭС. – С. 440–444.*

14. *Технологические особенности безопасной эксплуатации доменных печей в нестационарных режимах работы при выдувке и задувке* / В.И.Большаков, Н.М.Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Л.Г. Тубольцев, Н.Г. Иванча // Зб. наук. ст. ІЕЗ «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – Київ: ІЕЗ. – 2009. – С. 424–428.
15. *Бринза В.Н.,* Зиньковский М.М. Охрана труда в черной металлургии. – М.: Металлургия. – 1985. – 192 с.
16. *Обеспечение безопасности и сохранности футеровки доменных печей при выдувке и задувке.* /В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, С.Т.Шулико и др. // Металл и литье Украины. – 2009. – ?7–8. – С.75–79..

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук, проф. В.Ф.Поляковым*

***В.І.Большаков, Л.Г.Тубольцев, Г.М.Голубих***

***Забезпечення промислової безпеки металургійного виробництва.***

Розглянуто загальні принципи аналізу ризику виникнення аварійних ситуацій у металургійному виробництві, що базуються на використанні інформації щодо джерел загрози та кількісного оцінювання ризику. Розроблено науково-технічні положення та рішення щодо забезпечення тривалої та безпечної роботи металургійних агрегатів доменного та сталеплавильного виробництва. Показано, що основою промислової безпеки металургійного підприємства є здійснення моніторингу та контролю технологічних, технічних та організаційних показників виробництва.