

**Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко, В.Ф.Поляков, Г.Н.Голубых,  
Н.И.Падун, В.А.Горохова**

## **К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОНВЕРТЕРОВ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ**

Целью работы является разработка методических рекомендаций по повышению промышленной безопасности эксплуатации кислородных конвертеров отечественных предприятий в различных условиях и вариантах продувки ванны, в том числе с использованием перспективных технологий. Приведен анализ причин аварийных ситуаций и инцидентов в кислородно–конвертерном производстве и методика оценки вероятности их возникновения.

**кислородные конвертеры, промышленная безопасность, перспективные технологии, аварийные ситуации, методика оценки вероятности**

**Современное состояние вопроса.** Используемые технологии и получаемые в сталеплавильном производстве материалы и вещества, а также насыщенность кислородно–конвертерного цеха различным оборудованием и агрегатами, обуславливают возможность возникновения инцидентов и аварийных ситуаций, которые могут привести к экономическому ущербу, травмированию обслуживающего персонала, негативному влиянию на окружающую природную среду. Опыт эксплуатации технологического оборудования и агрегатов кислородно–конвертерных цехов (ККЦ) показывает, что продолжительность их безопасной работы определяется уровнем технологии и технического оснащения, главными составляющими которых являются: качество чугуна, лома, шихтовых материалов; рациональность технологии выплавки и разливки стали; эффективность используемых систем газоочистки и охлаждения; качество огнеупоров, используемых для футеровки конвертеров; техника выпуска продуктов плавки (стали и шлака); техническое состояние и надежность основного технологического оборудования.

ККЦ входит в состав сталеплавильного производства металлургического предприятия и, как правило, включает скрапное отделение, отделение перелива чугуна, шлаковый, загрузочный, конвертерный участки, отделение ремонта сталеразливочных и промежуточных ковшей, отделение непрерывной разливки стали и транспортно–отделочную линию. В состав основного оборудования современного типового ККЦ входят три конвертера, два агрегата доводки стали (АДС), агрегат «печь–ковш», комбинированная установка вакуумирования стали (КУВС), агрегат глубокой десульфурации чугуна, четыре криволинейные машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) для отливки заготовки.

В кислородно–конвертерном цехе получают, используются, хранятся, транспортируются опасные вещества: природный газ, технический

кислород, азот, аргон; используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115<sup>0</sup>С; котлы–утилизаторы конвертеров, трубопроводы пара и горячей воды; стационарно установленные грузоподъемные механизмы; получаются расплавы черных металлов и формируются жидкие шлаки. Поэтому кислородно–конвертерное производство относится к категории опасных производственных объектов.

Обеспечение промышленной безопасности кислородно–конвертерного производства является неотъемлемым требованием конкурентоспособного существования металлургического предприятия 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; разработку методик оценки риска возникновения аварийных ситуаций для выбора мероприятий по снижению их уровня.

Задача по снижению риска аварийности в кислородно–конвертерном производстве является актуальной для металлургических предприятий. Для ее решения необходимо разработать методические рекомендации, направленные на повышение безопасности эксплуатации кислородных конвертеров металлургического предприятия при различных технологических вариантах производства стали.

Подавляющее большинство высокотемпературных агрегатов сталеплавильного производства являются потенциально опасными источниками возникновения техногенных аварий, основной особенностью которых является наличие расплавленного металла, шлака и газов, способных в определенных условиях взрываться, вызывать пожары и отравления. Самыми распространенными и типовыми авариями сталеплавильного производства являются аварии, связанные с взрывоопасными веществами (горючими газами) и выбросами расплавленных металлов. Наиболее опасными причинами являются: износ футеровки конвертера; конвертерные газы; взрывы и выбросы в конвертере.

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. Окись углерода, содержащаяся в конвертерном газе, в смеси с кислородом образует взрывоопасную смесь. Предел взрываемости составляет: окись углерода – от 12,6 до 75 % по объему, при объемной доле кислорода более 5,6 %. Водород в смеси с воздухом образует «гремучую смесь». Пределы взрываемости водорода составляют от 4,0 до 75 % по

объему. Течь воды из котла–утилизатора и других водоохлаждаемых элементов, расположенных над конвертером, может привести к попаданию влаги в конвертер и, как следствие, к образованию взрывоопасной смеси газов, особенно при работе по технологии без дожигания или с частичным дожиганием CO.

Процесс производства стали в конвертерах с продувкой ванны кислородом связан с образованием большого количества газов, которые содержат мелкодисперсную пыль и токсичные газы (CO, SO<sub>2</sub>) [1].

Конвертерные газы образуются в результате выгорания углерода шихты и разложения известняка. Выход 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 м<sup>3</sup>/ч. Температура дымовых газов на выходе из горловины конвертера в течение плавки повышается от 1250–1300<sup>0</sup>С в начале продувки, до 1600–1700<sup>0</sup>С в середине и конце продувки. Основными компонентами конвертерных газов являются CO и CO<sub>2</sub>, объемное содержание которых составляет соответственно 60–85 % и 10–20 %. В отходящих газах в незначительном количестве могут присутствовать O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar. Содержание диоксида серы в газах составляет до 300 мг/м<sup>3</sup> [1].

Технологическая пыль, выносимая из конвертера, состоит из мелких фракций сыпучих материалов (извести, руды и т.д.) и тонкодисперсной пыли, содержащих в основном оксиды железа. Химический состав пыли: Fe<sub>общ</sub> до 70 %, MnO 0,3–0,5 %, SiO<sub>2</sub> 1,0–2,0 %, CaO 0,8–3,2 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,5–1,0 % [2]. Гранулометрический состав: 0–3 мкм – 59 %, 3–6 мкм – 6 %, 6–10 мкм – 7 %, 10–20 мкм – 7 %, 20–40 мкм – 7 %, 40–100 мкм – 9 %, более 10–5 %. В течение всей плавки выброс пыли распределяется неравномерно. Максимальное значение запыленности отмечается в момент подачи сыпучих материалов. Количество пыли, выносимой из конвертера, достигает 1,5 % от массы продуктов плавки, что на 1 тонну жидкой стали составляет около 16 кг. Запыленность конвертерных газов составляет 180–200 г/м<sup>3</sup> [3]. При дожигании содержащегося в газах оксида углерода на свече в большом количестве образуются оксиды азота, которые выбрасываются в атмосферу.

**Методика исследования.** Учитывая вышеизложенное, среди проблем промышленной безопасности эксплуатации кислородных конвертеров особое внимание уделяется обеспечению безопасности работы газоотводящего тракта. В первую очередь, безопасность работы газоотводящего тракта кислородных конвертеров связана с химическим составом отходящего газа.

Исходя из теории и практики кислородно–конвертерного процесса, за основу систематизации вариантов процессов следует принять классификационный комплекс, определяющий химический состав отходящих газов. Наиболее приемлемым представляется распределение вариантов по

основному признаку, которым является способ подачи в конвертер кислорода и других технологических газов: продувка кислородом сверху (в глухдонном 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.

В условиях экспериментального конвертера емкостью 1,5 т в Институте черной металлургии НАН Украины проведены исследования различных вариантов кислородно–конвертерного процесса. Выполнен анализ динамики изменения химического состава отходящего газа по представленным видам кислородно–конвертерного процесса. По ходу исследования осуществлялся контроль химического состава газа. В табл.1 приведены данные типичных плавок каждого вида кислородно–конвертерного процесса, анализ которых позволяет выделить наиболее точные различия в составе отходящего газа.

При комбинированной продувке с подачей нейтрального газа через донные фурмы в составе отходящих газов появляются элементы нейтральных газов, в приведенном случае азота. При использовании для защиты донных кислородных фурм газообразных углеводородов в отходящем газе могут появиться значительные количества водорода, особенно в начале продувки при малом количестве отходящего газа. При донной продувке кислородом обеспечивается наиболее высокое содержание СО в отходящем газе (табл.1).

Видовые различия проявляются и в запыленности газов. Наибольшая запыленность соответствует продувке кислородом сверху, самая низкая – продувке снизу, среднее значение – комбинированной продувке (табл. 1). Для каждого вида процесса на химический состав отходящего газа основное влияние оказывают: конструкция верхнего дутьевого устройства, использование теплоносителей. Конструктивные особенности верхних фурм влияют на дожигание газа (соотношение СО и СО<sub>2</sub>). Использование теплоносителей (природного газа, угольного топлива в кусковом и порошкообразном виде) приводит к увеличению содержания Н<sub>2</sub> в газе.

Выполнен анализ влияния конструкции верхней кислородной фурмы на динамику химического состава отходящего газа. На рис.1 представлена динамика изменения содержания СО<sub>2</sub> в отходящем газе при продувке кислородом сверху. Использование двухъярусных фурм оправдывает свою цель – дожигание СО до СО<sub>2</sub>, особенно в первой половине продувки. На рис.2,3 представлена динамика изменения содержания СО<sub>2</sub> и СО в отходящем газе по ходу продувки. В каждом виде процесса имеются свои особенности в организации дожигания, что сказывается на уровне дожигания.

При применении дожигания безопасной работе верхних кислородных фурм усложненной конструкции необходимо уделять дополнительное внимание в инструкциях по их эксплуатации. Донные фурмы дополняются трактом подачи порошкообразного топлива, для вдувания которого

используются системы с трубопроводами и сосудами, работающими при высоком давлении. Для безопасной работы конвертеров в таких условиях должны обеспечиваться специальные дополнительные меры.

Таблица 1. Данные типичных плавок различных вариантов кислородно-конвертерного процесса.

Время продувки	Химический состав дыма						Время отбора пробы	
	CO, %	CO <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %	N <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> , %	пыль, г/м <sup>3</sup>	мин.	% от длит.
Продувка кислородом сверху								
13 мин.	67,9	31,8	0,3	–	–	51	2–3	19
	69,4	30,5	0,1	–	–	54	4–5	35
	74,8	25	0,2	–	–	62	6–7	50
	82,0	18	–	–	–	43,5	8–9	65
Продувка кислородом снизу								
13 мин.– 30 сек.	77,2	10,6	0,5	–	11,7	8,97	1–2	15
	91,0	8,9	0,1	–	–	8,42	3–4	30
	93,4	6,6	–	–	–	8,47	5–6	46
	96,5	3,5	–	–	–	7,35	8–9	69
	97,5	2,5	–	–	–	6,6	10–11	85
Продувка кислородом сверху и нейтральным газом снизу								
13 мин.	31,2	61,5	1,5	4,5	1,3	37,4	1–2	15,0
	29,7	66,5	1,3	1,9	0,6	31,8	3–4	31,0
	61,3	35,5	0,5	2,3	0,4	24,3	5–6	46,0
	78,3	19,0	0,5	2,2	–	10,7	8–9	70,0
Продувка кислородом сверху и снизу								
8 мин.– 45сек.	19,5	80,6				4,4	1–2	18
	39,4	60,6				4,5	2–3	30
	74,0	25,9	0,1			18,3	3–4	42
	83,5	16,3	0,2			38,2	4–5	54
	85,0	15,0				19,3	7–8	91

Выполнен анализ влияния теплоносителей в кислородно-конвертерном процессе с повышенной долей лома, а также для условий работы без жидкого чугуна. Для подобных вариантов технологий используется комбинированная продувка кислородом сверху и снизу. Эта технология в настоящее время на предприятиях Украины не применяется, однако результаты анализа могут быть использованы при развитии таких технологий в перспективе.

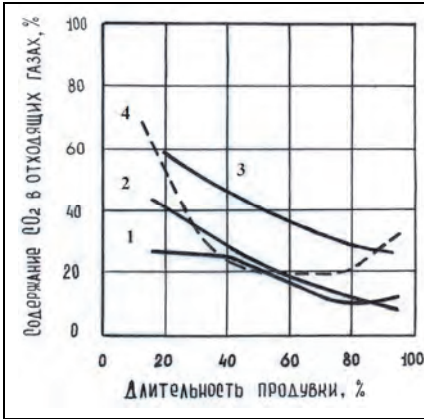


Рис.1. Изменение содержания  $\text{CO}_2$  в отходящих газах по ходу продувки кислородом сверху в глуходонном конвертере: 1 – с обычной верхней фурмой (односопловая); 2 – с двухъярусной верхней фурмой при расположении 2-го яруса на уровне 200 мм от торца фурмы; 3 – с двухъярусной верхней фурмой при расположении 2-го яруса на уровне 300 мм от торца фурмы; 4 – на плавках с продувкой кислородом сверху и через донные фурмы.

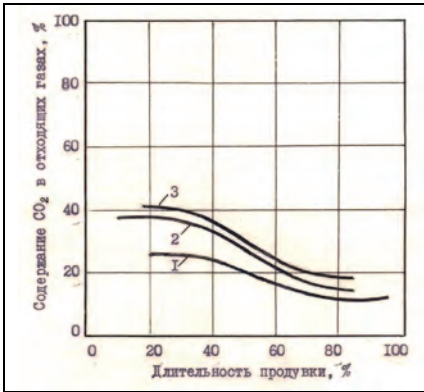


Рис.2. Изменение содержания  $\text{CO}_2$  в отходящих газах по ходу продувки: 1 – на плавках с верхней продувкой кислородом (среднее за плавку – 18,5 %); 2 – на плавках с продувкой кислородом сверху и нейтральным газом через днище (среднее за плавку – 23,5 %); 3 – на плавках с продувкой кислородом сверху через двухъярусную фурму и нейтральным газом через днище (среднее за плавку – 41,0 %).

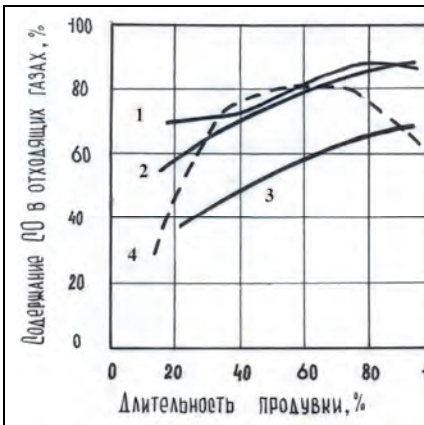
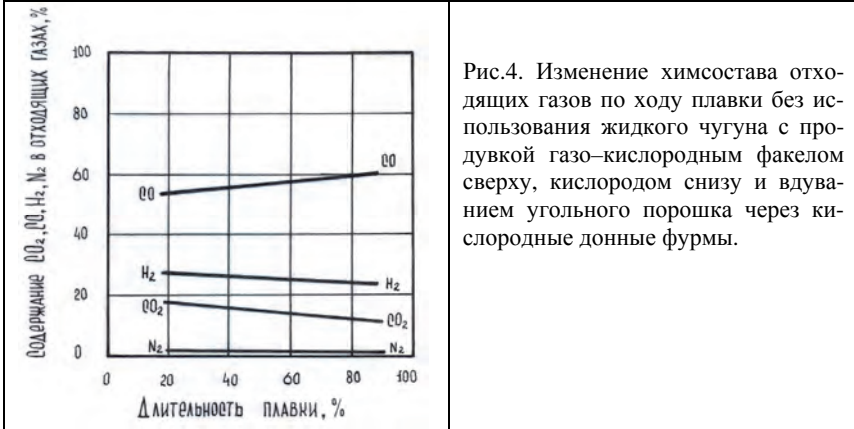


Рис.3. Изменение содержания  $\text{CO}$  в отходящих газах по ходу продувки: 1 – на плавках с верхней продувкой кислородом; 2 – на плавках с продувкой кислородом сверху и нейтральным газом через днище; 3 – на плавках с продувкой кислородом сверху через двухъярусную фурму и нейтральным газом через днище; 4 – на плавках с продувкой кислородом сверху и через донные фурмы.

Главным отличием химического состава отходящего газа в таких вариантах технологий является наличие водорода (10–25 %). На рис. 4 представлена динамика изменения химсостава отходящих газов по ходу плавки без использования жидкого чугуна с продувкой газо–кислородным факелом сверху, кислородом снизу и вдуванием угольного порошка через кислородные донные фурмы.



При реализации кислородно–конвертерного процесса без использования дополнительного топлива состав конвертерного газа достаточно сложный (%): CO – 70,0–72,8; CO<sub>2</sub> – 12,5–14,0; N<sub>2</sub> – 11,0–15,6; H<sub>2</sub> – 0,7–1,2; O<sub>2</sub> – 0,1–0,3; C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – 0,3; CH<sub>4</sub> – 0,03; NO – 0,0005; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> – 0,0004; H<sub>2</sub>S – 0,00001; SO<sub>2</sub> – 0,00005; S<sub>орг</sub> – 0,01. Использование теплоносителей приводит к увеличению содержания водорода в отходящем газе. В частности, при применении природного газа увеличивается содержание H<sub>2</sub> в отходящем газе. При использовании угольного топлива в отходящем газе могут появляться составляющие летучих угольного топлива, в состав которых входят газы: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>. Состав и количество летучих зависит от состава и свойств угольного теплоносителя. Главным источником взрывоопасности является CO. Температуры и пределы воспламенения отдельных газов приведены в таблице 2.

Диаграмма взрывобезопасных концентраций газовой смеси CO–O<sub>2</sub>–(CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>) показывает, что для надежного обеспечения взрывобезопасности работы конвертера с утилизацией отходящего газа необходимо разбавлять его азотом, особенно в начале и в конце продувки при комбинированной продувке с подачей нейтрального газа снизу (рис.5). Обеспечение безопасной работы кислородных конвертеров требует проведения оптимизации задач использования и утилизации отходящих газов.

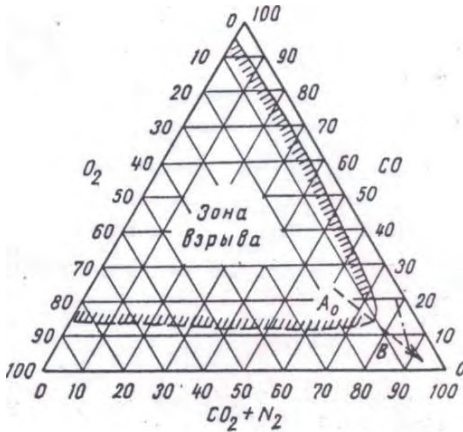


Рис.5. Диаграмма пределов взрываемости газовой смеси CO–O<sub>2</sub>–(CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>): A<sub>0</sub> – рабочая точка воспламенения смеси; B – рабочая область продувки азотом.

Таблица 2. Температуры и пределы воспламенения отдельных газов.

Газ	Химическая формула	Пределы воспламенения в смеси с воздухом, %		Температура воспламенения газозооушной смеси, град.С
		min	Max	
Водород	H <sub>2</sub>	4,1	74,0	530–590
Окись углерода	CO	12,5	75,0	610–658
Метан	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5,4	13,9	654–790
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,5	78,0	335–500
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,1	12,5	530–594
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,0	28,6	540–550
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,4	9,5	530–580
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2,4	10,3	–
n-бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,7	8,4	490–569
А-бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1,7	9,0	–
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1,4	6,7	720–770
Сероводород	H <sub>2</sub> S	4,5	45,0	290–487
Доменный газ		35,0	75,0	530
Коксовый газ		7,0	21,0	300–500
Генераторный газ		20,7	73,7	530
Городской газ		5,3	31,0	560–750
Природный газ		4,5	13,5	530
Нефть				360–400
Бензин				410–560
Керосин				270–320



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.

Анализ показал, что причинами аварий являются: конструктивные недостатки, нарушения при строительстве и эксплуатации оборудования. Основные травмирующие факторы: падение предметов и пострадавших с высоты (37,5%); выбросы расплавов металлов и раскаленных газов из металлургических агрегатов (25,0%); воздействие вращающихся и движущихся частей оборудования (12,5%); технологический транспорт (12,5%); воздействие технологических газов (12,5%). Выявлены основные причины несчастных случаев: неудовлетворительные 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%), неудовлетворительные организация и проведение ремонтных работ (50%).

В табл.3 приведен анализ аварий в кислородно–конвертерном производстве, частота случаев аварийных ситуаций и инцидентов, их удельный вес, а также аварийные потери производства.

Таблица 3. Виды аварий в кислородно–конвертерном производстве.

Вид аварии	Частота случаев, %	Удельный вес в аварийных потерях, %	Аварийные потери пр–ва, т/случай
Разрушение футеровки	1,9	1,2	2000
Прогар футеровки ванны	10,4	9,3	2900
Выплавка стали	11,0	17,7	5200
Выпуск и разливка стали	20,6	20,0	3100
Общехозяйственные	56,1	51,8	3000

Аварии по технологическим причинам составляют менее 50 %. Наиболее значительные по частоте случаев и удельному весу аварийные потери производства происходят при выпуске и разливке стали. Аварии при выплавке стали отличаются более значительными 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 дымосо-

са, прогарам труб газоходов и др. Поломки механического оборудования примерно в половине случаев приводят к самопроизвольному повороту конвертера. Из технологических аварий наиболее значительными являются взрывы в конвертере, связанные с попаданием 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.

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 снижение риска возникновения аварий и включающие: мероприятия по модернизации и реконструкции оборудования; новые технические решения и технологии в обслуживании и ремонте оборудования; инновационные разработки для энергосбережения, переработки отходов производства и повышения его экологической безопасности; производственный контроль соблюдения требований промышленной безопасности; экспертизу промышленной и экологической безопасности оборудования, зданий и сооружений; страхование риска ответственности за причинение вреда при эксплуатации опасных производственных объектов; мероприятия по предупреждению и ликвидации аварийных ситуаций; методические рекомендации по оценке риска возникновения аварийных ситуаций и инцидентов.

Наиболее распространенным подходом при оценке риска [4] является использование выражения:

$$R_{инц. i} = \sum_i^n P_{инц. i} \cdot Y_{инц. i}, \quad (1)$$

где  $P_{инц. i}$  – вероятность возникновения инцидента на  $i$ -том оборудовании;  $Y_{инц. i}$  – ущерб от возникновения инцидента на  $i$ -том оборудовании;  $n$  – количество оборудования производственного процесса. Использование вероятностных методов при прогнозировании аварийности в кислородно-конвертерном производстве, которые базируются на использовании статистических данных, позволяет дать количественную оценку степени случайности появления инцидентов [5,6].

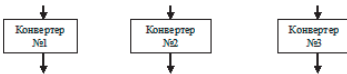
В результате анализа статистических данных о произошедших аварийных ситуациях в ККЦ за 1999–2002 гг. установлено, что для оценки вероятности возникновения инцидентов технологический процесс выплавки и разливки стали целесообразно разбить на пять блоков (подсистем), соответствующих этапам технологического процесса: прием, обработка и транспортировка продуктов конвертерного передела (чугун, лом, шихтуемые материалы); выплавка стали; внепечная обработка стали; разливка стали; транспортно-отделочная линия (рис.6).

Предложенная методика вероятностной оценки возникновения аварийных ситуаций и инцидентов на основном оборудовании кислородно-конвертерного производства показала, что возникновение инцидентов и аварийных ситуаций в кислородно-конвертерном цехе можно описать законом Пуассона, а время ликвидации – показательным законом [7–10]. На основании [11] мы получаем классическую задачу теории массового обслуживания. На  $R_i$  однотипном оборудовании подсистемы кислородно-конвертерного производства возникают инциденты с интенсивностью  $\lambda_{инци}$ . При возникновении инцидента его немедленно начинают ликвидировать. Система обеспечения безаварийной работы оборудования кислородно-конвертерного цеха относится к классу систем массового обслуживания с ожиданием, т.к. вышедший из строя агрегат не будет возобновлять работу до ликвидации причин вызвавших его остановку, т.е. агрегат встанет в очередь на обслуживание [11].

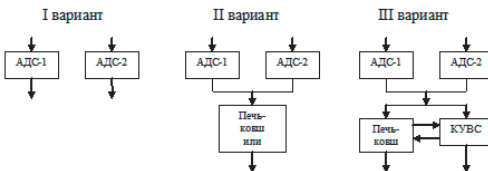
**1. Прием, обработка и транспортировка продуктов конвертерного передела**



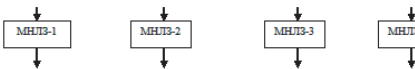
**2. Выплавка стали**



**3. Внешняя обработка стали**



**4. Разливка стали**



**5. Транспортно-отделочная линия**

Рис.6. Схема осуществления технологического процесса в кислородно-конвертерном цехе.

Проведение оценки возможных состояний работы оборудования по этапам кислородно-конвертерного производства позволило составить дифференциальные уравнения [11] и вывести выражение для определения

вероятности того, что все оборудование каждой подсистемы работает безотказно:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{R_i} \frac{\rho_i^k}{k!} + \frac{\rho_i^{R_i+1}}{R_i!(R_i - \rho_i)}}, \quad (2)$$

где  $\rho_i = \frac{\lambda_{инци}}{\mu_{ликв.i}}$ ,  $\mu_{ликв.i} = \frac{1}{t_{ликв.i}}$  – величина обратная математическому

ожиданию времени ликвидации инцидента на  $i$ -том оборудовании.

Поскольку вероятность возникновения аварийной ситуации или инцидента вычисляется по формуле:

$$P_{инци} = 1 - P_0, \quad (3)$$

то вероятность возникновения аварийных ситуаций и инцидентов в кислородно–конвертерном производстве определится из выражения: ,

$$P_{инци} = 1 - \frac{1}{\sum_{k=0}^{R_i} \frac{(\lambda_{инци} t_{ликв.i})^k}{k!} + \frac{(\lambda_{инци} t_{ликв.i})^{R_i+1}}{R_i!(R_i - \lambda_{инци} t_{ликв.i})}} \quad (4)$$

где  $R_i$  – количество однотипных агрегатов подсистемы процесса производства и разливки стали в кислородно–конвертерном цехе;  $\lambda_{инци}$  – плотность потока инцидентов подсистемы оборудования в год;  $t_{ликв.i}$  – время ликвидации инцидента, год. Значения  $\lambda_{инци}$  и  $t_{ликв.i}$  определяются из выражений:

$$\lambda_{инци} = \frac{n_i}{t_{раб.i}}, \quad (5)$$

где  $n_i$  – количество инцидентов на  $i$ -том оборудовании за рассматриваемый промежуток времени его работы;  $t_{раб.i}$  – фактическое время работы  $i$ -того оборудования за рассматриваемый промежуток времени его работы, год;

$$t_{ликв.i} = \frac{t_{ликв.iобщ}}{n_i}, \quad (6)$$

где  $t_{ликв.iобщ}$  – общее время ликвидации инцидентов подсистемы технологического процесса в ККЦ;  $n_i$  – количество инцидентов на  $i$ -том оборудовании за рассматриваемый промежуток времени его работы.

Таким образом, полученные выражения (2)–(6) позволяют определить вероятность возникновения аварийных ситуаций на оборудовании кислородно–конвертерного производства и вероятность безотказной работы оборудования. Эти выражения предлагается применять при расчете риска возникновения аварийных ситуаций и инцидентов при различных вариантах технологического процесса производства стали. Полученные выражения позволяют также установить зависимость величины риска возникновения аварийных ситуаций от вариантов осуществления технологии сталеплавильного процесса.

При расчете вероятностей возникновения аварийных ситуаций и инцидентов рассматривалась работа пяти подсистем оборудования кислородно–конвертерного цеха по трем вариантам производства стали. Из ста-

статистических данных о произошедших аварийных ситуациях в ККЦ за 1999–2002 гг. определено количество инцидентов  $n_i$ , общее время их ликвидации  $t_{ликв\text{общ}}$ , фактическое время работы оборудования  $t_{работ}$  в каждой подсистеме. На основании полученных данных определены интенсивность инцидентов  $\lambda_{инци}$  за время работы оборудования ККЦ и среднее время ликвидации  $t_{ликв\text{ср}}$  для каждой подсистемы конвертерного процесса. Результаты расчета вероятности возникновения инцидентов  $P_{инци}$  и вероятности безотказной работы  $P_{0i}$  оборудования ККЦ для различных вариантов технологии производства стали представлены в табл.4.

Таблица 4. Вероятности возникновения инцидентов  $P_{инци}$  и безотказной работы  $P_{0i}$  основного оборудования ККЦ.

Номер этапа технологического процесса			Исследуемый период, года			
			1999	2000	2001	2002
1.	Прием, обработка, транспор–тировка продуктов плавки	$P_{инци1}$	0	0,00556	0,00041	0,00153
		$P_{01}$	1	0,99444	0,99959	0,99847
2.	Выплавка стали	$P_{инци2}$	0,02385	0,04383	0,04032	0,03184
		$P_{02}$	0,97615	0,95617	0,95968	0,96816
3.	I–ый вариант внепечной обработки стали: (АДС)	$P_{инци}$ <i>3.1 АДС</i>	0	0,00738	0	0,02233
		$P_{03.1}$ <i>АДС</i>	1	0,99262	1	0,97767
	II–ой вариант внепечной обработки стали: (АДС, КУВС)	$P_{инци}$ <i>3.2 КУВС</i>	0	0,02075	0,00242	0,07814
		$P_{03.2}$ <i>КУВС</i>	1	0,97925	0,99758	0,92186
	II–ой вариант внепечной обработки стали: (АДС, печь–ковш)	$P_{инци}$ <i>3.2 печь–ковш</i>	0	0,01896	0	0,02233
		$P_{03.2}$ <i>печь–ковш</i>	1	0,98104	1	0,97767
III–ий вариант внепечной обработки стали: (АДС, печь–ковш, КУВС)	$P_{инци}$ <i>3.3</i>	0	0,03869	0,00242	0,09872	
	$P_{03.3}$	1	0,96131	0,99758	0,90128	
4.	Разливка стали	$P_{инци4}$	0,06149	0,04952	0,05892	0,07941
		$P_{04}$	0,93851	0,95048	0,94108	0,92059
5.	Транспортно–отделочная линия	$P_{инци5}$	0,00314	0,00296	0	0,00213
		$P_{04}$	0,99686	0,99704	1	0,99787

**Заключение.** В работе выполнено экспериментальное и аналитическое исследование возможностей повышения промышленной безопасности эксплуатации конвертеров и экологической безопасности процесса выплавки стали, а также проведен анализ влияния вариантов технологий кислородно–конвертерной плавки на calorийность и взрывобезопасность отходящего газа. При эксплуатации кислородных конвертеров особое внимание уделяется безопасности работы газоотводящего тракта, которая связана с химическим составом отходящего газа. Установлено, что для каждого вида кислородно–конвертерного процесса на химический состав отходящего газа основное влияние оказывают: конструкция верхнего дутьевого устройства и использование теплоносителей. Использование теплоносителей приводит к увеличению содержания  $H_2$  в отходящем газе. Показано, что calorийность газа, в основном, определяется содержанием  $CO$ . Организация дожигания отходящего газа в конвертере будет приводить к снижению его теплотворной способности. Использование топлива в виде природного газа также будет снижать теплотворную способность отходящего газа. Наличие водорода в отходящем газе будет увеличивать его взрывоопасность. Использование угольного топлива приводит к увеличению взрывоопасности газа. Данные табл.9 показывают, что аварийные ситуации и инциденты с наибольшей вероятностью возникают при использовании в технологии всего комплекса оборудования кислородно–конвертерного производства (АДС, КУВС, печь–ковш) –  $P_{инци}=0,09872$  и с наименьшей – при обработке стали только агрегатами доводки стали (АДС) –  $P_{инци}=0,02233$ .

Таким образом, обеспечение безопасной работы кислородных конвертеров требует проведения оптимизации задач использования и утилизации отходящих газов. Предложенная методика вероятностной оценки возникновения аварийных ситуаций и инцидентов на основном оборудовании кислородно–конвертерного производства, направленная на обеспечение промышленной безопасности процесса выплавки и разлива стали, показала, что возникновение инцидентов и аварийных ситуаций в кислородно–конвертерном цехе можно описать законом Пуассона, а время ликвидации – показательным законом. С использованием теории массового обслуживания получены выражения для оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на оборудовании кислородно–конвертерного производства и вероятности безотказной работы оборудования в зависимости от вариантов технологического процесса производства стали. Полученные результаты показывают, что наиболее аварийными являются: кислородные конвертера, участки внепечной обработки стали, МНЛЗ.

1. *Бринза В.Н., Зиньковский М.М.* Охрана труда в черной металлургии. – М.: Металлургия. – 1985. – 192с.
2. *Авраменко Ф.Д., Карнаух Н.Н., Хорошев Т.Н.* Управление охраной труда на металлургическом предприятии. – М.: Металлургия. – 1982. – 248с.

3. *Бигеев А.М., Бигеев В.А.* Металлургия стали. Теория и технология выплавки стали. – Магнитогорск: МГТУ. – 2000. – 544с.
4. *Тэпман Л.Н.* Риски в экономике / Под ред. Швандера В.А. – М.: Юнити–Дана. – 2002. – 380с.
5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука. – 1969. – 576с.
6. *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высшая школа. – 1970. – 239с.
7. *Гребеник В.М., Цапко В.К.* Надежность металлургического оборудования. Справочник. – М.: Металлургия. – 1989. – 592с.
8. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука. – 1965. – 524с.
9. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения (Приложение 3 «Значения  $\chi^2$  в зависимости от  $k$  и  $p$ »). Учебное пособие. – 5-е изд. – М.: КНОРУС. – 2010. – 480с.
10. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. Пер. с англ. под ред. В.В. Налимова. – М.: Мир. – 1969. – 395с.
11. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука. – 1966. – 432с.

*Статья рекомендована к печати  
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

***Л.Г.Тубольцев, В.П. Корченко, В.Ф.Поляков, Г.М.Голубих, Н.І.Падун,  
В.О.Горохова***

**До питання підвищення промислової безпеки конвертерів та екологічної безпеки процесів виплавляння сталі**

Метою роботи є розробка методичних рекомендацій щодо підвищення безпеки експлуатації кисневих конвертерів вітчизняних підприємств в різних умовах і варіантах продування ванни, зокрема з використанням перспективних технологій. Приведено аналіз причин аварійних ситуацій та інцидентів в киснево-конвертерному виробництві та методика оцінки вірогідності їх виникнення.