В. В. Числављев[1] (✉), к. т. н. **С. В. Фейлер**[1], к. т. н. **Д. В. Бойков**[2], **Д. Т. Неунывахина**[1]

[1] *ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия*

[2] *АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк, Россия*

УДК 666.76:669.18:046.518

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОГНЕУПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ

Проведено физическое и математическое моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше 4-ручьевой блюмовой МНЛЗ для условий ЕВРАЗ ЗСМК. Выполнена качественная оценка процессов перемешивания расплава с использованием физической модели промежуточного ковша. Дана количественная оценка эффективности рафинирования металла от неметаллических включений в промежуточном ковше при использовании моделей огнеупорных элементов различной конфигурации. Разработаны рекомендации по конструктивным параметрам полнопрофильных огнеупорных перегородок промежуточного ковша.

Ключевые слова: *рафинирование стали, неметаллические включения, огнеупорные элементы, физическое моделирование, математическое моделирование, промежуточный ковш, непрерывная разливка стали.*

Успех в реализации металлопродукции определяется не только ее соответствием государственным и международным стандартам, но и дополнительными требованиями, предъявляемыми заказчиками к качеству стали ответственного назначения, в частности к рельсовому металлу. В работах, выполненных специалистами ОАО ВНИИЖТ, ИМЕТ РАН и ОАО УИМ [1–5], отмечается, что эксплуатационная стойкость рельсов в пути значительно зависит от чистоты стали по неметаллическим включениям. Причиной образования контактно-усталостных дефектов, как правило, служат крупные оксидные и нитридные недеформируемые неметаллические включения [5]. Рафинирование расплава от неметаллических включений осуществляется в процессе внепечной обработки и непрерывной разливки стали. При этом эффективность мероприятий, реализуемых в процессе внепечной обработки, может быть повышена при обеспечении условий рафинирования стали в процессе непрерывной разливки [6].

В связи с тем, что промежуточный ковш является последней футерованной емкостью, в которой металл находится в жидком состоянии, в ковше целесообразно осуществлять рафинирование металла от докристаллизационных неметаллических включений. Условия рафинирования металла в промежуточном ковше во многом определяются гидродинамическими процессами, которые обусловливают распределение и динамику движения металлического расплава и неметаллических включений. Гидродинамические процессы, в свою очередь, определяются конфигурацией внутреннего объема промежуточного ковша, которую можно изменять, устанавливая специальные огнеупорные элементы с определенными геометрическими параметрами, оптимизированными под условия и параметры процесса непрерывной разливки стали.

Для оценки эффективности и совершенствования конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша 4-ручьевой МНЛЗ электросталеплавильного цеха ЕВРАЗ ЗСМК разработан лабораторно-экспериментальный комплекс (рис. 1) [7], основным элементом которого является физическая модель промежуточного ковша, выполненная из прозрачного органического стекла в масштабе 1,0 : 2,5 с обеспечением подобия исследуемых процессов. В качестве моделирующей жидкости используется вода, поскольку кинематические вязкости воды при комнатной температуре и жидкой стали при температуре разливки близки. Визуализация потоков жидкости осуществляется введением в струю воды индикатора (красителя), в качестве которого используется водный раствор $KMnO_4$ концентрацией 3 г/л. Информацию о направлении и скорости движения потоков жидкости в различных зонах промежуточного ковша и о минимальной длительности пребывания моде-

✉
В. В. Числављев
E-mail: chisl.vv@yandex.ru

лирующей жидкости при различных технологических параметрах процесса разливки стали и конструкции промежуточного ковша получали путем обработки видеоматериала с показом кинограмм. Оценка степени гомогенизации жидкости, уточнение минимальной длительности пребывания моделирующей жидкости в промежуточном ковше и определение объема застойных зон осуществлялись кондуктометрическим методом. В качестве индикатора использовался раствор хлорида натрия. Электрическую проводимость и содержание NaCl в воде измеряли солемером PS202, датчики которого установлены в разливочных стаканах модели промежуточного ковша. При этом показания солемера непрерывно регистрировались.

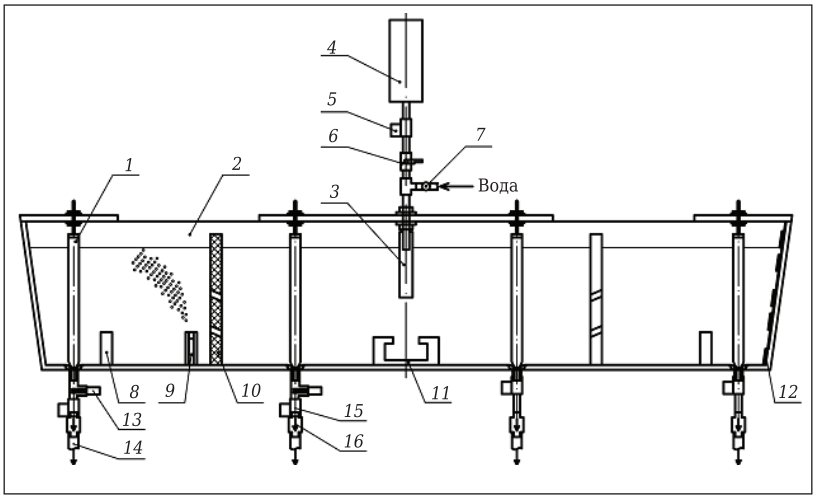

Рис. 1. Схема лабораторно-экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше: *1* — стопор; *2* — модель промежуточного ковша; *3* — труба подвода моделирующей жидкости; *4* — резервуар для красителя (солевого раствора); *5* — электромагнитный клапан (нормально закрытый) для подачи красителя; *6* — кран; *7* — вентиль, регулирующий расход моделирующей жидкости; *8–11* — модели рафинирующих устройств; *12* — датчики уровня моделирующей жидкости; *13* — датчики солемера; *14* — линии отвода моделирующей жидкости; *15* — электромагнитный клапан (нормально открытый) для отвода моделирующей жидкости; *16* — расходомеры

Физические модели огнеупорных элементов были реализованы методом послойного моделирования (FDM) с помощью технологии 3D-печати (рис. 2), что позволило обеспечить точность геометрических параметров моделей. Гидродинамику металла исследовали при разливке стали со скоростью 0,7 м/мин с подачей металла в промежуточный ковш через защитную трубу и получении заготовки сечением 300×360 мм. Моделирование проводили при различных вариантах конструкции промежуточного ковша: *1* — без огнеупорных элементов (базовый вариант); *2* — с установкой струегасителей, различной высоты (рис. 2, *а*): *А* — 64 мм, *Б* — 96 мм, *В* — 128 мм; *3* — с установкой полнопрофильных перегородок с переливными отверстиями, направляющими поток моделирующей жидкости к поверхности под углом 30°, различных конфигураций (рис. 2, *б*): *А* — диаметр всех отверстий 20 мм, *Б* — отверстия нижнего ряда диаметром 20 мм, верхнего — 32 мм, *В* — отверстия нижнего ряда диаметром 32 мм, верхнего — 40 мм.

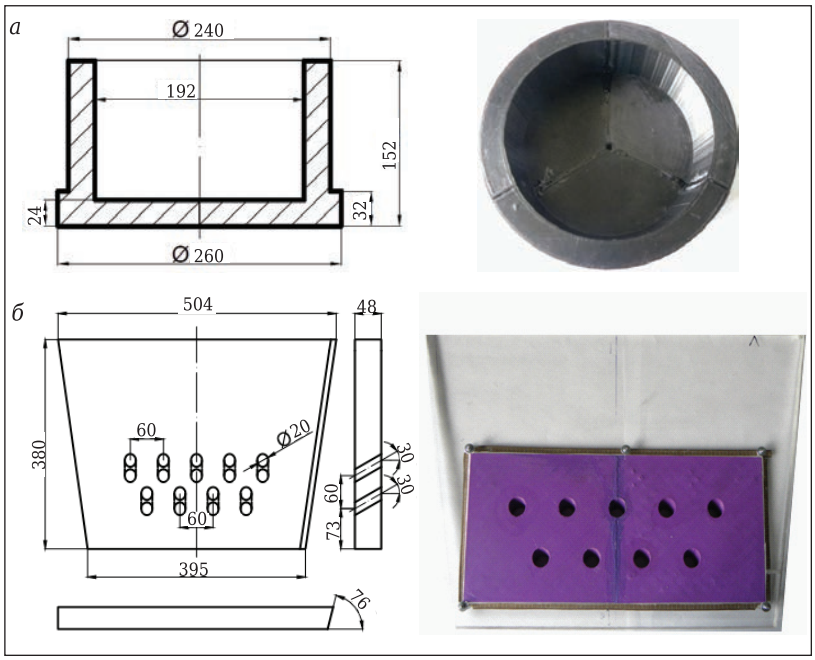

Рис. 2. Модели огнеупорных элементов промежуточного ковша: *а* — струегаситель; *б* — полнопрофильные перегородки

Оценку эффективности конфигурации промежуточного ковша для рафинирования металлического расплава от неметаллических включений осуществляли при использовании метода исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (RTD). Для определения скорости потоков металлического расплава в объеме промежуточного ковша использовали методы вычислительной гидродинамики на разработанной математической модели [8, 9], при этом в качестве индикатора использовали жидкость с физическими характеристиками, анало-

гичными жидкой стали. По условиям моделирования введение индикатора осуществлялось в течение 5 с, затем непрерывно поступал поток жидкой стали. Установлено, что при базовом варианте конструкции промежуточного ковша время достижения центрального и периферийного разливочных стаканов составляет 4 и 33 с соответственно (рис. 3). Достижение потока центральных разливочных стаканов осуществляется за короткий временной интервал, образуя при этом «короткие» пути, что в промышленных условиях приводит к попаданию докристаллизационных неметаллических включений, транспортируемых потоком металла, в кристаллизатор и далее в непрерывнолитую заготовку.

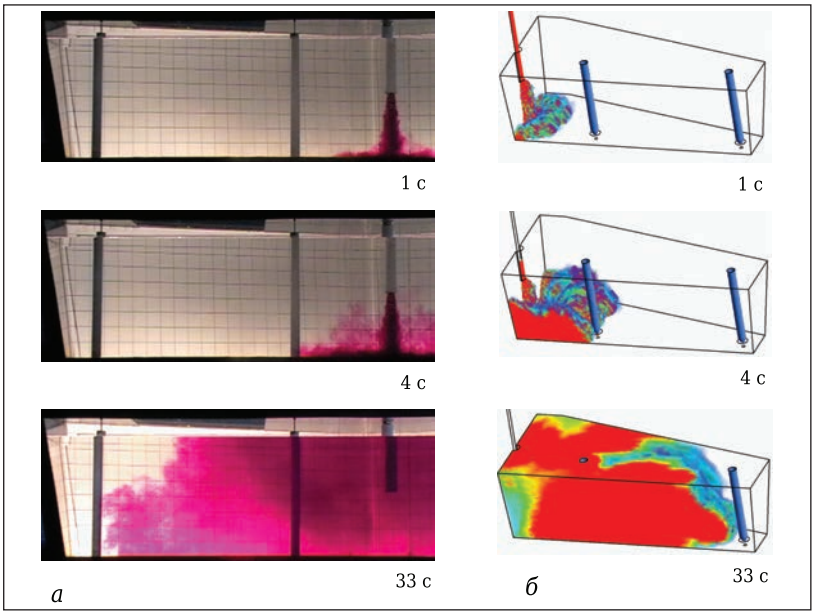

Рис. 3. Гидродинамическая картина в промежуточном ковше базовой конструкции, полученная методами физического (*а*) и математического моделирования (*б*)

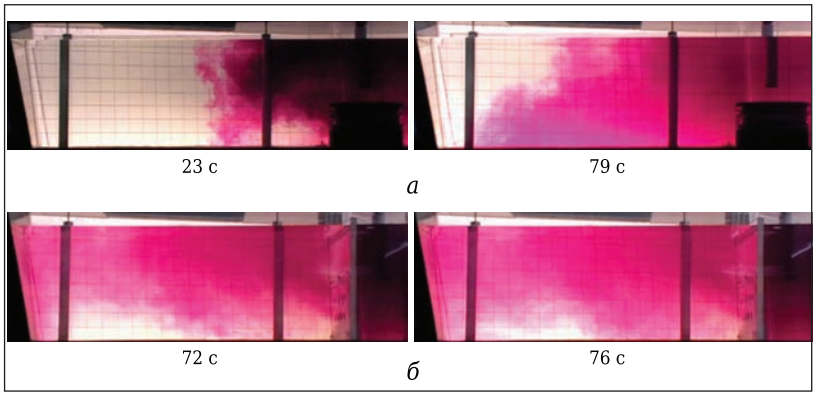

Рис. 4. Гидродинамическая картина в промежуточном ковше: *а* — с использованием струегасителя; *б* — с использованием полнопрофильных перегородок

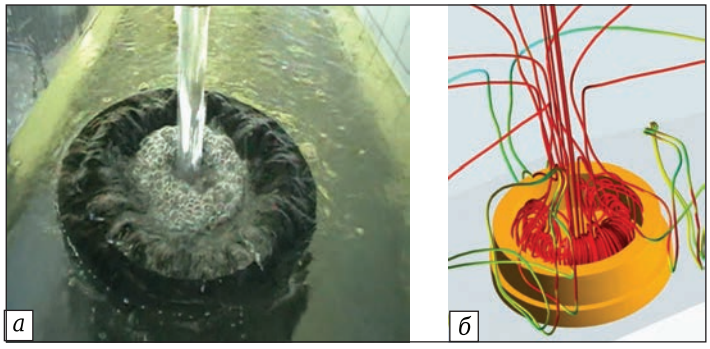

Рис. 5. Гидродинамические процессы в объеме струегасителя при физическом (*а*) и математическом (*б*) моделировании

Дальнейшие исследования гидродинамики металла в промежуточном ковше проводили с использованием струегасителей и полнопрофильных перегородок различной конфигурации. Результаты исследований в характерные моменты времени (достижение разливочных стаканов) показаны на рис. 4. При попадании моделирующей жидкости в объем струегасителя происходит подавление части энергии струи за счет циркуляции (см. рис. 4, 5), после чего поток направляется к поверхности, отражается и поступает к разливочным стаканам (см. рис. 4, *а*). В результате циркуляции в ограниченном объеме скорость гидропотоков в объеме промежуточного ковша уменьшается. При таком режиме течения наблюдаются уменьшение области с активными завихрениями, снижение турбулентности и, как следствие, увеличение минимальной длительности пребывания металла в промежуточном ковше.

При установке полнопрофильных перегородок происходит разделение промежуточного ковша на три камеры (одну приемную и две разливочные). В приемной камере происходит активная циркуляция моделирующей жидкости, через переливные отверстия поток поступает в разливочные камеры (см. рис. 4, *б*). Струи, проходящие через отверстия в перегородках, направляются к поверхности и достигают ее в зоне центральной части разливочной камеры между стопорами. При достижении поверхности происходит условное разделение основного потока на

две части. Одна часть движется вдоль поверхности и, доходя до торцевых стенок, устремляется к периферийным разливочным стаканам и далее движется с меньшей скоростью в придонных слоях вблизи задних стенок к центральным разливочным стаканам. Другая часть, отраженная от поверхности основного потока, направляется к центральному разливочному стакану.

На рис. 6 показано время достижения порцией модельной жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов для исследуемых вариантов. Видно, что при использовании моделей полнопрофильных перегородок с отверстиями нижнего ряда диаметром 20 мм и верхнего ряда диаметром 32 мм (вариант *3Б*) время достижения центральных и периферийных разливочных стаканов различается на 4 с, что свидетельствует об активной циркуляции моделирующей жидкости, ее гомогенизации и отсутствии «коротких» путей.

Анализ результатов моделирования, полученных кондуктометрическим методом, позволяет сделать вывод о том, что объем застойных зон в промежуточном ковше базового варианта *1* конструкции составляет около 28 % (рис. 7), а наличие «короткого» пути к центральным разливочным стаканам не позволяет в полной мере обеспечить гомогенизацию металлического расплава по химическому составу и температуре, а также рафинирование металлического расплава от неметаллических включений; требуется применение дополнительных огнеупорных элементов для организации движения потоков металла, увеличения минимального времени пребывания порции металла в промежуточном ковше и создания зон активной циркуляции расплава, уменьшения объема застойных зон.

Использование струегасителя позволяет значительно увеличить время пребывания порции моделирующей жидкости в объеме модели промежуточного ковша до 23 и 79 с для центральных и периферийных ручьев соответственно (см. рис. 4, *а* и 6). При этом увеличение высоты модели струегасителя до 128 мм способствует уменьшению объема застойных зон до 25 % (см. рис. 7). Однако эффективность применения струегасителя имеет кратковременный характер: поток расплава, отражаясь от поверхности, ниспадает; образуются придонные потоки.

По результатам моделирования установлено, что наилучшие результаты достигаются при использовании полнопрофильных перегородок с двумя рядами отверстий — диаметром 20 мм для нижнего ряда и 32 мм для верхнего. В этом случае моделирующая жидкость направляется к поверхности, создавая замкнутый контур циркуляции, охватывающий практически весь объем промежуточного ковша (см. рис. 4, *б*). Кроме того, при использовании перегородок время достижения потоком моделирующей жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов максимально и составляет 72 и 76 с соответственно (см. рис. 4, *б* и 6), что подтверждается анализом данных, полученных кондуктометрическим методом (рис. 8). В промышленных условиях такое распределение потоков будет способствовать удалению неметаллических включений путем их коагуляции и дальнейшей ассимиляции покровным рафинировочным шлаком. При этом объем застойных зон составляет менее 18 % (см. рис. 7).

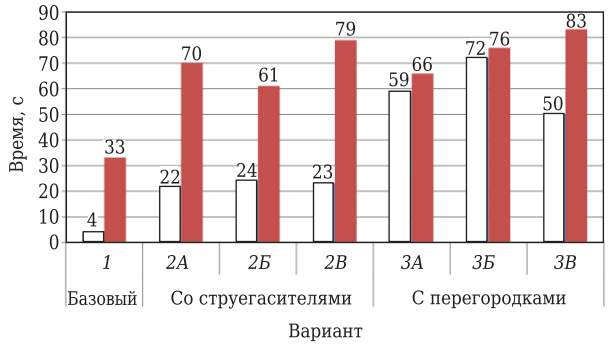

Рис. 6. Минимальное время достижения потока моделирующей жидкости центральных (□) и периферийных (■) разливочных стаканов при использовании различных моделей огнеупорных элементов

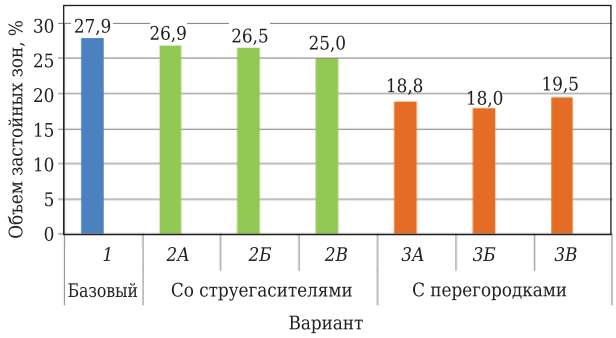

Рис. 7. Объем застойных зон в промежуточном ковше

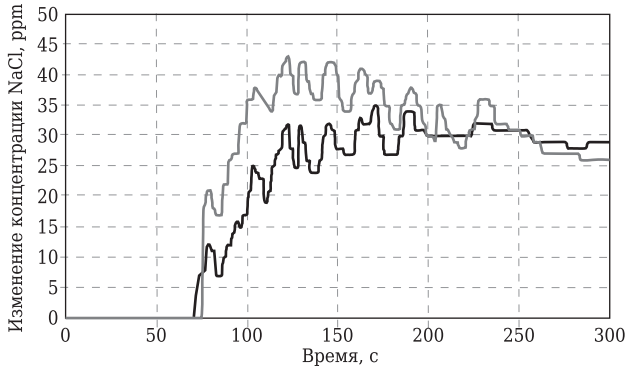

Рис. 8. Изменение концентрации NaCl по ходу процесса при использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок (вариант *Б*): —— — центральный ручей; —— — периферийный ручей

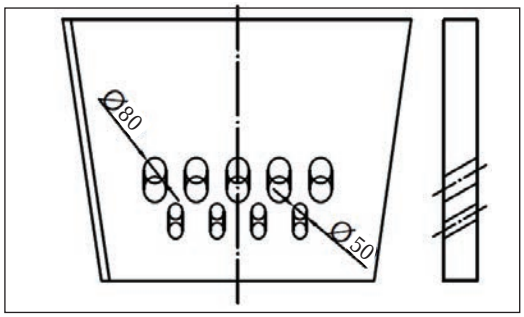

Рис. 9. Геометрические параметры полнопрофильной перегородки для промежуточного ковша МНЛЗ-1 ЕВРАЗ ЗСМК

Таким образом, для обеспечения рафинирования металлического расплава от неметаллических включений и гомогенизации расплава по химическому составу и температуре рекомендуется оснастить промежуточный ковш МНЛЗ двумя перегородками (рис. 9), установленными на расстоянии 360 мм от оси защитной трубы.

* * *

Работа выполнена в СибГИУ по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, проект МК-1191.2017.8.

Библиографический список

1. ***Григорович, К. В.*** Применение фракционного газового анализа для оценки эксплуатационных свойств рельсовой стали / Повышение качества и эксплуатационной стойкости рельсовой продукции : сб. докладов / *К. В. Григорович, А. М. Арсенкин, С. С. Шибаев.* — М. : Интекст, 2005. — 168 с.

2. ***Дерябин, А. А.*** Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали / *А. А. Дерябин, А. В. Добужская* // Сталь. — 2000. — № 11. — С. 38–43.

3. ***Дерябин, А. А.*** Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте / *А. А. Дерябин, В. А. Рабовский, Е. А. Шур* // Сталь. — 2000. — № 11. — С. 82–85.

4. ***Линчевский, Б. В.*** Влияние раскисления кордовой стали на природу оксидных неметаллических включений / *Б. В. Линчевский, С. Н. Вартпатрикова, В. Я. Дашевский* [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2002. — № 5. — С. 14–18.

5. ***Добужская, А. Б.*** Исследование неметаллических включений в рельсах и очагах контактно-усталостных дефектов / Неметаллические включения в рельсовой стали : сб. науч. тр. / *А. Б. Добужская, А. А. Дерябин, В. И. Сырейщикова.* — Екатеринбург : ГНЦ РФ ОАО «УИМ», 2005. — 152 с.

6. ***Казаков, А. А.*** Управление процессами образования неметаллических включений при производстве конвертерной стали / *А. А. Казаков, П. В. Ковалев, С. В. Рябошук* [и др.] // Черные металлы. — 2014. — № 4. — С. 43–48.

7. ***Числављев, В. В.*** Лабораторно-экспериментальный комплекс для изучения процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали / *В. В. Числављев, С. В. Фейлер* // Современные вопросы теории и практики обучения в вузе : сб. науч. тр. — 2015. — Вып. 18. — С. 60–72.

8. ***Числављев, В. В.*** Моделирование процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали / *В. В. Числављев, С. В. Глушков* ; науч. рук. С. В. Фейлер // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : тр. Всероссийской науч. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 1–3 июня 2016 г. — Новокузнецк : СибГИУ, 2016. — Вып. 20. Ч. 3 : Естественные и технические науки. — С. 175–178.

9. ***Протопопов, Е. В.*** Разработка математической модели гидродинамики металлического расплава в промежуточном ковше четырехручьевой машины непрерывного литья заготовок / *Е. В. Протопопов, В. В. Числављев* [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сб. науч. тр. — М. – Новокузнецк : СибГИУ, 2015. — Вып. 34. — С. 24–29. ■

Получено 19.07.17
© В. В. Числављев, С. В. Фейлер, Д. В. Бойков, Д. Т. Неунывахина, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

2-я Глобальная конференция и выставка Cemprocess
Оптимизация в цементной промышленности

global cemprocess
PROCESS OPTIMISATION IN CEMENT MANUFACTURE
CONFERENCE & EXHIBITION

23–24 мая 2018 г. Лондон, Великобритания

www.globalcement.com