

## **КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА**

СМИРНОВ А.Н. (ДонГТУ)

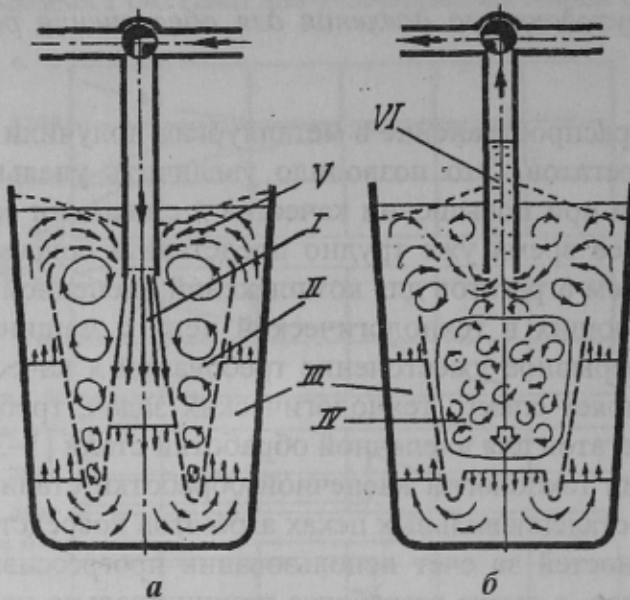
*Рассмотрены принципы оптимизации конструкции распределительного клапана и газового ресивера в агрегатах для пульсационного перемешивания металла. Оптимизированы режимы подачи импульса вынуждающего давления для обеспечения резонансных колебаний при обработке.*

В последние десятилетия широкое распространение в металлургии получили методы доводки стали вне плавильных агрегатов. Это позволило увеличить удельную производительность плавильных агрегатов при повышении качества и снижении себестоимости металлопродукции. В настоящее время уже трудно представить современный сталеплавильный цех без наличия в нем агрегатов для комплексной внепечной обработки стали, гармонично функционирующих в технологической цепи с машинами непрерывной разливки. Между тем, непрерывное ужесточение требований к качеству металлопродукции соответственно расширяет спектр технологических задач, требующих решения в рамках использования агрегатов для внепечной обработки стали [1–3].

Основными направлениями развития технологий внепечной обработки стали являются универсализация существующих в сталеплавильных цехах агрегатов посредством расширения их функциональных возможностей за счет использования прогрессивных вспомогательных и огнеупорных материалов, а также разработка принципиально новых методов внепечной обработки, обеспечивающих достижение дополнительных качественных эффектов и позволяющих существенно расширить принципиальные возможности внепечной обработки металла в целом. Одним из таких методов внепечной обработки является способ перемешивания жидкого металла пульсирующей затопленной струей (метод пульсационного перемешивания) [4–5]. Промышленные исследования этого метода, выполненные различными группами ученых в последние 15–20 лет, полностью подтверждают гипотезу о высокой эффективности этого метода в целом и его конкурентоспособности по отношению к традиционным методам внепечной обработки.

Основное отличие метода пульсационного перемешивания от известных способов внепечной обработки металлургических расплавов заключается в высокой интенсивности перемешивания при направленном движении потоков металла в жидкой ванне без вовлечения шлака, что позволяет интенсифицировать процессы рафинирования, легирования и доводки стали. Схематическое представление о расположении наиболее характерных зон, формирующихся в объеме жидкости в ходе перемешивания пульсирующей затопленной струей, идентифицированное на прозрачной физической модели и описанное с помощью математической модели, представлено на рисунке 1. При разделении объемов расплава на условные характерные области в качестве сравнительных отличительных критериев были приняты скорость и направление движения конвективных потоков, а также степень их турбулизации. Как видно из рисунка 1, при вытеснении порции жидкости из погружаемой трубы, формируется зона продвижения струи (I), расположенная между нижним ее срезом и дном емкости и имеющая форму усеченного конуса. Обычно движение жидкости на этом участке сопровождается формированием тороидальных вихрей (зона II) по внешней границе струи. Далее поток движущейся жидкости вступает в контакт с дном емкости и, изменив направление, поднимается вертикально вверх вдоль стенок емкости (зона III). Для этой зоны характерно достаточно плавное направленное движение жидкости, приближающееся к ламинарно-

му. Таким образом, зона вихреобразных потоков II располагается между зонами I и III. Вихревые тороидальные потоки зоны II смешиваются с потоками зоны I в районе донной части емкости. При переходе пульсационного режима на цикл всасывания вместо зон I и II формируется характерная турбулентная зона IV с большим числом разнонаправленных вихрей и высокой степенью турбулизации. Между поверхностью жидкости и нижним срезом погружаемой трубы можно выделить зону нестабильной турбулентности V, в которой происходит достаточно плавное движение потоков вдоль поверхности



**Рисунок 1** — Общая схема движения конвективных потоков, формирующихся при вытеснении (а) и заполнении (б) жидкостью погружаемой трубы: 1 — зона продвижения струи; 2 — рециркуляционная зона замкнутых вихрей; 3 — зона ламинарных восходящих потоков; 4 — зона стабильной турбулентности; 5 — зона подповерхностных потоков; 6 — зона движения жидкости в трубе

жидкости при определенных возмущениях внутренних зон в период всасывания. В целом поверхность жидкости в ковше при пульсационном воздействии сохраняется спокойной, что исключает вовлечение в перемешивание покровного шлака, как это, например, происходит при продувке металла аргоном. Следует отметить, что при определенных частотах пульсаций возможно развитие на поверхности расплава стоячих волн низких порядков (порядка нескольких Герц).

В дополнение к приведенной схеме необходимо остановиться на рассмотрении движения жидкости непосредственно во внутренней полости погружаемой трубы (VI). Для этой зоны характерно возвратно-поступательное движение жидкости с максимальной скоростью. Соответственно при достижении определенных режимов пульсаций следует ожидать проявления кавитационных явлений при истечении жид-

кости из погружаемой трубы. В этом случае внутренняя поверхность погружаемой трубы и ее форма может иметь также достаточно большое значение с точки зрения развития процессов кавитации [6–7]. Помимо этого, как показали визуальные наблюдения, при определенных режимах пульсаций на поверхности жидкости в погружаемой трубе могут возникать интенсивные всплески, которые при определенных обстоятельствах могут препятствовать нормальной работе оборудования [8–9]. В результате всплесков отдельные объемы жидкости отрываются от поверхности и увлекаются вверх потоками выходящего из внутренней полости трубы газа. Это явление, безусловно, требует самостоятельного изучения для обеспечения нормальной работоспособности пульсационного агрегата.

Как показывают наблюдения, режим однофазного (жидкостного) перемешивания соблюдается при вытеснении из внутренней полости погружаемой трубы не более 85–90% всего объема находящейся в ней жидкости. Дальнейшее увеличение объема вытесняемой порции приводит к тому, что струя захватывает в себя часть рабочего газа, который вовлекается в перемешивание, двигаясь вдоль внешней поверхности зоны I и затем в зоне III. Видимо, пузырьки газа попадают во внутрь кольцевых тороидальных вихрей. Такой характер движения пузырьков газа сохраняется вплоть до подачи за один



кой характер движения пузырьков газа сохраняется вплоть до подачи за один цикл до 125–130% газа, необходимого для обеспечения полного вытеснения металла из внутренней полости погружаемой трубы. Учитывая, что пузырьки газа проделывают путь от нижнего среза трубы вниз вдоль внешней границы струи, а затем всплывают вверх вместе с восходящими конвективными потоками в периферийных зонах ковша, есть полное основание утверждать, что такой комбинированный режим пульсационного воздействия (совместно с вдуванием газа в расплав) имеет некоторые технологические преимущества в сравнении с обычной продувкой газом через погружаемые фурмы. Существо этих преимуществ следует связывать с рассредоточением пузырьков газа по всему объему жидкости, что в совокупности с увеличением длительности пребывания пузырьков в жидкости и снижением всплесков и выбросов на поверхности металла в ковше позволит повысить эффективность рафинирования металла и степень усвоения вводимых реагентов.

Таким образом, процесс пульсационного перемешивания металла в ковше представляет собой сложную колебательную систему, для рационального функционирования которой необходимо обеспечить определенную совокупность функционального и технологического оборудования.

Обобщая известные технические решения, используемые в агрегатах для пульсационного перемешивания металлургических расплавов, можно выделить следующие основные функциональные конструктивные единицы, которые обязательно входят в состав таких установок (рисунок 2): футерованная или керамическая погружаемая труба 1; система подводящих и отводящих газ трубопроводов 2; распределительное устройство (клапан), обеспечивающее периодическую подачу и стравливание газа из внутренней полости погружаемой трубы 3; промежуточная газовая камера (ресивер) 4, которая обеспечивает высокий мгновенный расход газа при вытеснении металла и регулирование его расхода в ходе пульсации.

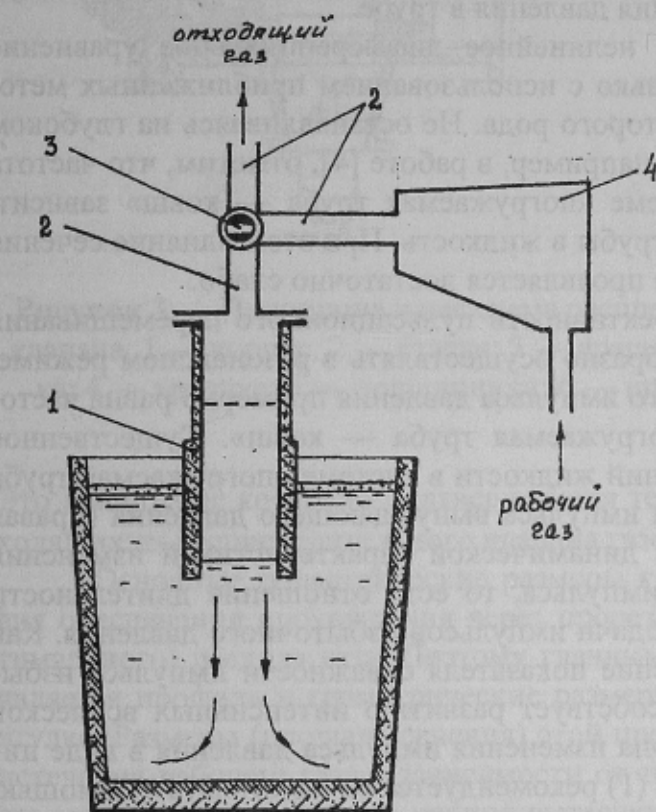


Рисунок 2 — Основные функциональные узлы, входящие в состав агрегатов для пульсационного перемешивания металла: 1 — погружаемая труба; 2 — система подводящих и отводящих газ трубопроводов; 3 — распределительный клапан; 4 — ресивер

С точки зрения обеспечения рационального режима колебаний жидкости в системе «погружаемая труба — ковш» наиболее важным конструктивным элементом представляется распределительный клапан с системой подводящих и отводящих газ трубопроводов. Основными функциями такой системы является регулирование подачи и отвода газа из внутренней полости трубы, а также согласование параметров колебаний жидкости в системе «погружаемая труба — ковш» и закона изменения импульса вынуждающего давления.

Уравнение движения поверхности столба жидкости в погружаемой трубе для консервативной системы «погружаемая труба — ковш», выведенное с определенными допущениями, имеет следующий вид [4]:

$$(h_0 + cx)\chi + 0,5c\xi + B\xi + gx = Df(\omega, \tau), \quad (1)$$

где  $h_0$  — приведенная глубина погружения трубы, учитывающая влияние на процесс колебаний жидкости, расположенной ниже нижнего среза трубы, м;  $x, \xi, \chi$  — соответственно координата, скорость и ускорение поверхности жидкости в трубе (за нулевое значение принимается уровень жидкости в ковше);  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\omega$  — частота пульсаций, Гц;  $\tau$  — время, с;  $c = 1 + S_1/S_2$ ;  $S_1$  — площадь сечения внутренней полости погружаемой трубы, м<sup>2</sup>;  $S_2$  — площадь сечения ковша, м<sup>2</sup>;  $B = \beta/(\rho S_1 c)$ ;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  — коэффициент диссипации энергии в процессе пульсации;  $D = P_0/(\rho c)$ ;  $P_0$  — амплитуда изменения давления в трубе.

Уравнение (1) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка и может быть решено только с использованием приближенных методов на основе эллиптического интеграла второго рода. Не останавливаясь на глубоком анализе уравнения (1), который выполнен, например, в работе [4], отметим, что частота собственных колебаний жидкости в системе «погружаемая труба — ковш» зависит, главным образом от глубины погружения трубы в жидкость. При этом влияние сечения трубы и геометрических параметров ковша проявляется достаточно слабо.

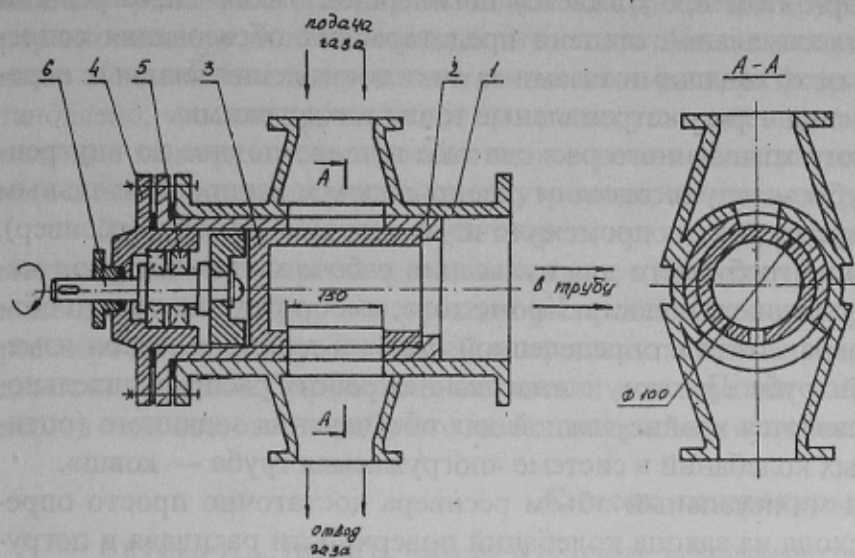
Для достижения максимальной эффективности пульсационного перемешивания процесс вынужденных колебаний целесообразно осуществлять в резонансном режиме, то есть когда частота подачи вынуждающего импульса давления примерно равна частоте собственных колебаний в системе «погружаемая труба — ковш». Существенное влияние на характер вынужденных колебаний жидкости в системе «погружаемая труба — ковш» оказывает также закон изменения импульса вынуждающего давления (правая часть уравнения (1)). При этом основной динамической характеристикой изменения импульса давления является скважность импульса, то есть отношение длительности периода следования импульса к периоду подачи импульсов избыточного давления. Как было показано нами в работе [4], увеличение показателя скважности импульса избыточного давления свыше 5–6 единиц способствует развитию интенсивных всплесков внутри погружаемой трубы. Введение закона изменения импульса давления в виде пилообразного закона изменения в уравнение (1) рекомендуется осуществлять с помощью ряда Фурье.

Обеспечение требуемых характеристик закона изменения импульса вынуждающего давления (синхронность подачи и регламентируемая величина скважности импульса) удастся достигнуть только посредством специальной конструкции распределительного клапана. При выборе конструкции распределительного клапана необходимо учитывать также специфику условий его эксплуатации: периодический нагрев и охлаждение движущихся частей клапана; высокая вероятность попадания в рабочее пространство клапана твердых раскаленных частиц шлака или металла вместе с отходящими газами; увеличение в несколько раз объема стравливаемого газа в сравнении с объемом газа при вытеснении металла и т.п.

Анализ известных технических решений показывает, что в промышленной эксплуатации отсутствуют стандартные системы дискретного распределения газа, полностью удовлетворяющие вышеперечисленным условиям. В качестве базового варианта была принята концепция электромеханического распределительного клапана, которая применительно к рассматриваемым условиям обладает определенными преимуществами перед системой электромагнитных клапанов, так как в последнем случае требуется



дополнительная достаточно сложная автоматическая система согласования режима работы клапанов. Определенные сложности могут также возникнуть при согласовании режимов пульсации и времени срабатывания заслонок клапанов, которые соизмеримы с длительностью цикла пульсаций.



**Рисунок 3** — Принципиальная схема распределительного клапана: 1 — корпус; 2 — стакан; 3 — вращающаяся втулка; 4 — крышка; 5 — подшипники; 6 — приводной вал

Общий вид разработанной автором конструкции распределительного клапана, используемого в промышленной установке для пульсационной обработки металла в 80–100-тонных ковшах, представлен на рисунке 3. Между неподвижной поверхностью стакана 2 и вращающейся втулкой 3 предусмотрен зазор, составляющий 0,25 мм. Расчет величины зазора выполнен при допущении, что в течение одного цикла пульсации перепад температур в теле вращающейся втулки может составлять 800–900°C.

Это допущение косвенно подтверждается тем фактом, что измеренная температура отходящих из распределительного клапана газов составляла 1000–1200°C.

Основные геометрические размеры клапана рекомендуется определять из условия обеспечения прохождения через прорезь вращающейся втулки необходимого (оптимального) расхода газа. Поэтому главным (лимитирующим) звеном, на наш взгляд, является профиль и геометрические размеры прорези во вращающейся (дозировочной) втулке. Размеры (площадь сечения) этой прорези определяются из условий свободного истечения рабочего газа в зависимости от требуемого из заданных условий пульсаций его мгновенного расхода в период вытеснения металла. В разработанной конструкции рациональный режим подачи и стравливания газа обеспечивается определенным соотношением между площадью сечения прорези во вращающейся втулке и площадями прорезей для подачи рабочего газа и его стравливания в неподвижном стакане. Экспериментальными исследованиями установлено, что отношение площади прорези в стакане для подачи газа к площади прорези во вращающейся втулке должно составлять 2–4 единицы, а отношение площади прорези в стакане для отвода рабочего газа к площади прорези во вращающейся втулке должно составлять, по меньшей мере, 8–12 единиц.

Регулирование частоты пульсаций осуществлялось посредством изменения частоты вращения электродвигателя. К преимуществам электромеханического привода для распределительного клапана следует отнести возможность оперативного корректирования частоты пульсаций в зависимости от глубины погружения трубы.

Не менее важным элементом функционирования пульсационных агрегатов является обеспечение требуемого высокого мгновенного расхода в стадии вытеснения металла из внутренней полости погружаемой трубы. Как показывают расчеты, максимальная величина мгновенного расхода газа превышает средний (расчетный) расход газа на обра-

ботку примерно в 8–12 раз. При этом оптимальный закон изменения величины расхода газа при вытеснении металла предполагает плавное уменьшение абсолютной величины в течение цикла подачи. Это способствует падению давления (почти до атмосферного) во внутренней полости погружаемой трубы еще до начала цикла стравливания газа. Движение порции металла в трубе при этом продолжается по инерции. Такая схема режима пульсационной обработки в максимальной степени предотвращает образования всплесков металла и захвата его брызг отходящими газами за счет достижения плавных переходов в законе изменения давления через экстремальные точки циклограммы.

Для обеспечения высокого мгновенного расхода газа при его подаче во внутреннюю полость погружаемой трубы между питающим газопроводом и распределительным клапаном целесообразно предусматривать промежуточную газовую камеру (ресивер), которая обеспечивает накопление требуемого для пульсации рабочего газа в период между циклами его подачи во внутреннюю полость. Кроме того, выбор рационального объема внутренней полости ресивера может в определенной степени влиять на закон изменения давления в погружаемой трубе. Поэтому согласованная работа распределительного клапана и ресивера представляется крайне важной для обеспечения заданного (оптимального) режима вынужденных колебаний в системе «погружаемая труба — ковш».

В первом приближении минимальный объем ресивера достаточно просто определяется расчетным путем, исходя из закона колебаний поверхности расплава в погружаемой трубе. Вместе с тем такой расчет не учитывает внутренних свойств системы питающего трубопровода, распределительного клапана, соединительного патрубка и условий поведения (нагрева) газа во внутренней полости погружаемой трубы. Как показали выполненные экспериментальные исследования, величина объема ресивера в значительной степени влияет на динамику изменения давления во внутренней полости погружаемой трубы. Экспериментально установлено, что рациональный объем ресивера должен составлять 1,4–2,0 объема внутренней полости погружаемой части пульсационной трубы (объем ресивера при этом варьировали в диапазоне 0–15 объемов внутренней полости погружаемой трубы, а объем системы трубопроводов между ресивером и распределительным клапаном составлял не более 4–8% от объема ресивера). При этом избыточное давление газа в ресивере перед пульсацией должно быть в диапазоне 1,5–3,0 величины феростатического давления у нижнего края погружаемой трубы. При увеличении объема ресивера свыше 3 объемов внутренней полости погружаемой части трубы значительно интенсифицируется процесс образования всплесков на поверхности жидкости, что на практике соответствует ускорению процесса зарастания внутренней полости трубы и выхода ее из эксплуатации. Вероятно, при небольшом объеме ресивера происходит некоторое сглаживание пиков закона изменения давления во внутренней полости погружаемой трубы, что препятствует образованию всплесков и улучшает условия эксплуатации агрегата в целом [8].

В результате выполненных исследований установлено, что эффективная работа ресивера достигается при его согласованной работе с распределительным клапаном. При этом целесообразно оптимизировать объем ресивера и давление газа в питающем трубопроводе и в ресивере перед пульсацией.

Комплексная оценка принятых конструктивных решений была выполнена на опытно-промышленной установке по внепечной обработке чугуна Донецкого металлургического завода и промышленных установках Краматорского завода «Энергомашспецсталь» для обработки жидкой фазы прибылей крупных слитков и отливок. Установлено, что организация пульсаций в резонансном режиме обеспечивает интенсивность перемешивания жидкой ванны, которая соответствует традиционным методам типа продувка металла в ковше. Процесс пульсационного перемешивания на резонансных частотах обеспечивает значи-



тельное (по меньшей мере, в 2–3 раза) увеличение интенсивности перемешивания жидкой ванны в сравнении с нерезонансными режимами воздействия. Резонансный эффект, как правило, сохраняется при отклонении частоты пульсаций от собственной частоты колебаний в системе «погружаемая труба — ковш» не более, чем на 10–15%. При этом рациональный режим вытеснения металла из погружаемой трубы обеспечивает проникновение порций металла до днища ковша, что создает благоприятные условия для гомогенизации всего объема металла и усвоения вводимых в расплав ферросплавов и модификаторов. Установлено, что для организации процесса пульсационного воздействия важным функциональным конструктивным элементом в агрегате является ресивер, позволяющий обеспечивать оптимальную подачу газа во внутреннюю полость погружаемой трубы.

В результате выполненных теоретических, лабораторных и промышленных экспериментов установлены рациональные режимы пульсационного воздействия и предложены рекомендации по выбору конструкции распределительного клапана и оптимальных размеров ресивера для подачи рабочего газа в агрегатах по пульсационному перемешиванию. Необходимость и целесообразность оптимизации конструкции распределительного клапана и режимов подачи и отвода рабочего газа подтверждена в промышленных условиях.

### Список литературы

1. Кудрин В.А., Парма В. Технология получения качественной стали. — М.: Металлургия, 1984. — 320 с.
2. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. Внепечная обработка стали. — М.: МИСИС, 1995. — 256 с.
3. Szekely J., Carlson G., Helle L. Ladle Metallurgy. — New York: Springer-Verlag, 1989. — 166 p.
4. Ефименко С.П., Пилюшенко В.Л., Смирнов А.Н. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. — М.: Металлургия, 1989. — 168 с.
5. Разработка процесса с пульсирующим перемешиванием для рафинирования жидкой стали в ковше / Т.Фудзии, Ю.Огучи, Н.Сумида и др. // Чистая сталь. Сб. научн. тр. — М.: Металлургия, 1987. — С. 191–205.
6. Ефимов В.А. Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл // Сталь, 1988. — № 4. — С. 21–27.
7. Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Промышленная теплотехника, 1997. — Т.19. — № 6. — С. 39–47.
8. Смирнов А.Н., Редько А.Л., Смирнов Е.Н. О влиянии скважности импульса изменения давления на эффективность пульсационного перемешивания металла в ковше // Известия вузов. Черная металлургия, 1988. — № 2. — С. 24–28.
9. Особенности гидродинамических процессов в установке для пульсационной обработки металла в сталеразливочном ковше / Ю.И.Шиш, Л.В.Рубин, Л.Г.Волков и др. // Известия вузов. Черная металлургия, 1988. — № 4. — С. 13–16.

© Смирнов А.Н., 1999.

## ГИДРОДИНАМИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ГАЗЛИФТНЫХ РЕАКТОРОВ

ЛИФЕНКО Н.Т. (ДонГТУ)

*Рассмотрены особенности гидродинамики металлургических газлифтных реакторов. Предложена математическая модель для расчета параметров циркуляционных потоков металла в подъемной колонне газлифта, определяющих эффективность протекания тепло- и массообменных процессов при подаче реагентов в подъемную колонну реактора.*

Кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии» Донецкого государственного технического университета на протяжении длительного времени