



ОТЗЫВ

на диссертационную работу Володина Алексея Михайловича **«Изучение влияния свободной конвекции на гидродинамику печей с барботажным слоем типа печей Ванюкова и Ромелт с целью разработки методов повышения их удельной производительности»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Актуальность работы

В теоретическом плане диссертация весьма актуальна, поскольку в дополнение к современным методам компьютерного моделирования многофазных потоков, в том числе газожидкостных систем (Direct numerical simulations, Euler-Euler approach, Euler-Lagrange approach, Volume of fluid method, Boltzmann lattice approach и др.), имеющим свои достоинства и ограничения, развивает новый подход, продолжающий метод квазигомогенной фазы (Quasi single-phase approach) в приближении модифицированной теории свободной конвекции.

Актуальными представляются и результаты математического моделирования, проведенного методом прямого численного расчета гидродинамики и массопереноса (DNS, без привлечения дополнительных моделей турбулентности), в приложении к условиям барботажных реакторов черной и цветной металлургии — соответственно, печи Ромелт и печи Ванюкова. Выработанные принципы и рекомендации по дутьевому режиму направлены на повышение эффективности работы этих промышленных агрегатов (устойчивости, удельной производительности и др.) и могут быть использованы при проектировании.

Достоверность проведенных исследований подтверждается хорошим соответствием численного расчета боковой продувки жидкой ванны в пузырьковом, переходном и струйном режимах данным независимого эксперимента. Расчеты проводились с использованием суперкомпьютера.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Теоретически обоснована применимость модифицированной теории свободной конвекции к моделированию газожидкостных течений.
2. Создана нестационарная математическая модель гидродинамики барботажного слоя с боковым дутьем, учитывающая эффекты переменной плотности и эффективной вязкости бинарной смеси.
3. Изучены гидродинамические и энергетические характеристики, а также зональность гравитационного перемешивания ванны в различных режимах продувки.

Научная значимость результатов исследований заключается в обосновании и компьютерной реализации нового подхода к моделированию газожидкостных систем, выработке принципов гидродинамического режима металлургических печей с барботажным слоем, при котором обеспечивается существенное повышение производительности промышленных агрегатов.

Практическое значение работы заключается в создании модельного программного комплекса, позволяющего рассчитывать основные параметры барботируемой жидкой ванны, в разработке рекомендаций по оптимизации гидродинамического режима металлургических барботажных реакторов типа печи Ванюкова и Ромелт. Отметим, что разработанная методика расчета уже используется при проектировании барботажных реакторов для переработки промышленных отходов (что нашло отражение в приложенном Акте внедрения).

Вопросы и замечания.

Состоявшаяся дискуссия по представленной работе выявила несогласие с некоторыми теоретическими положениями, развиваемыми автором. Это, однако, не снижает общей положительной оценки диссертации, посвященной разработке нового подхода к моделированию газожидкостных систем. По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Зачем, имея полную систему уравнений, задавать в фурменной зоне специфические условия однозначности, содержащие эмпирически подбираемые коэффициенты? Как показывает практика расчетов методами CFD, любая продувка описывается заданием скорости и газосодержания на выходе из дутьевого устройства.
2. На рис. 2 и рис. 4 автореферата светлым тоном показаны области, где присутствует газовая фаза. Рисунки раздельно демонстрируют распределения вертикальной и горизонтальной компонент скорости в пузырьковом (рис. 2) и струйном

(рис. 4) режимах. Как может быть, что области, содержащие газовую фазу, на парах рисунков (2а и 2б), (2в и 2г), (4а и 4б), (4в и 4г) разнятся?

3. Абсолютные цифры, приводимые в разделе «научной новизны» автореферата, не имеют смысла без указания конкретных условий, к которым они относятся.

4. В диссертации ввели эффективный коэффициент динамической вязкости бинарной смеси, который предложено рассчитывать по формуле (с. 5 автореферата):

$$\frac{1}{\mu_{эф}} = \frac{\varphi}{\mu_2} + \frac{1-\varphi}{\mu_{жс}}$$

Между тем, обычно используется другая формула:

$$\mu_{эф} = \mu_2 \varphi + \mu_{жс} (1-\varphi)$$

Обе формулы справедливы при крайних значениях $\varphi \in [0,1]$. Посмотрим, однако, на оценку $\mu_{эф}$ при, например, $\varphi = 0,5$. Расчет по первой формуле, с учетом $\mu_2 \ll \mu_{жс}$, дает неправдоподобный результат:

$$\frac{1}{\mu_{эф}} = 0,5 \left(\frac{\mu_2 + \mu_{жс}}{\mu_2 \mu_{жс}} \right) \sim \frac{0,5}{\mu_2}, \quad \text{т.е. } \mu_{эф} \sim 2\mu_2$$

В то же время, расчет по второй дает результат физически вполне очевидный:

$$\mu_{эф} = 0,5(\mu_2 + \mu_{жс}) \sim 0,5\mu_{жс}$$

По нашему мнению использование в базовых уравнениях модели первой формулы неправомерно.

Высказанные замечания по диссертации носят скорее дискуссионный характер и не снижают ценности проведенного исследования.

Представленная работа является законченным исследованием и выполнена на достаточно высоком научном уровне. Решенные диссертантом задачи представляют не только очевидный научный интерес, но и имеют значение в качестве методики и программного продукта, позволяющих повысить эффективность работы металлургических барботажных реакторов.

Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Володин Алексей Михайлович, заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Доклад диссертанта по материалам работы заслушан и обсужден на заседании научно-технического совета Института «Стальпроект» 11 марта 2020 г. Отзыв составлен по результатам обсуждения.

Директор, д.т.н.



Усачев А.Б.