

УДК 537.84,
PACS 47.65.-d, 47.80.-v

Воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду

А. Д. Мамыкин, Г. Л. Лосев, И. В. Колесниченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Академика Королёва, 1

В работе экспериментально исследуется течение водного раствора калийной щелочи в плоском вертикальном канале под действием электромагнитных сил применительно к задаче сепарации непроводящих включений. Генерация силы производится за счет пропускания электрического тока через раствор, помещенный во внешнее постоянное магнитное поле. Воздействие электромагнитной силы позволяет добиться локализации частиц примеси и исключения их из основного потока. Успешно разработана и применена методика определения концентрации на основе ультразвуковых измерений. Полученные кривые эволюции концентрации находятся в хорошем согласии с результатами оптических измерений.

Ключевые слова: электромагнитная сепарация; магнитная гидродинамика; двухфазная среда

Поступила в редакцию 11.01.2018; принята к опубликованию 30.01.2018

Influence of electromagnetic force on two-phase flow

A. D. Mamykin, G. L. Losev, I. V. Kolesnichenko

Institute of Continuous Media Mechanic UB RAS
614013, Perm, Akademika Koroleva st, 1

The experimental investigation of water solution of potassium alkali flow in vertical plane layer under influence of electromagnetic force have been occurred. The research is initiated by the problem of non-conductive particles separation. The generation of the force is occurred by interaction of electric current applied to solution and external direct magnetic field. The influence of the electromagnetic force allows to localized non-conductive particles and except them from mean flow. The method of particles concentration measurement have been successfully developed and allied. The results obtained from ultrasonic and optic measurements are in the good agreement.

Keywords: electromagnetic separation; magnetohydrodynamics; two-phase flow

Received 11.01.2017; accepted 30.01.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2018-1-46-53

1. Введение

Очистка и обогащение руд является актуальной и экономически важной задачей металлургии. Очищенный металл обладает повышенной механической прочностью и однородностью свойств,

что играет значительную роль при производстве. На практике для очищения металла от всевозможных примесей используются методы флотации [1] (пропускания через водную взвесь или расплав руды пузырьков газа, увлекающих частицы примеси за счет сил поверхностного натяжения) и отстаи-

вания расплава руды либо её взвеси в жидкости [2]. Во втором случае руду смешивают с жидкостью заданной плотности и добиваются всплытия либо осаждения частиц примеси. Таким образом, разделение компонентов смеси происходит под действием сил тяжести и плавучести. При очистке расплавленного металла данный способ становится энергозатратным, поскольку требует поддержания высокой температуры металла в ходе отстаивания в течение нескольких дней.

Эффективность разделения компонентов смеси за счет сил тяжести и плавучести можно повысить, влияя на эффективную плотность рабочей жидкости посредством внешних полей [3]. Примером такого рода устройств может послужить магнитожидкостный сепаратор, в котором внешнее магнитное поле позволяет контролировать эффективный вес жидкости, частично компенсируя (либо, наоборот, увеличивая) силу тяжести [4]. В силу высокой стоимости и относительно малого рабочего диапазона температур магнитных жидкостей данный метод используется преимущественно при обработке руд драгоценных металлов.

В электропроводящих средах возможно влияние на эффективную плотность среды за счет электромагнитных сил при пропускании тока через среду, помещенную во внешнее магнитное поле [5]. Данный метод применим как в расплавах металлов, так и в растворах электролитов. В первом случае утяжеление металла электромагнитной силой приводит к выталкиванию неметаллических примесей (силикаты, сульфаты и т. п.) на поверхность, откуда они могут быть механически удалены. Во втором случае измельченную руду взвешивают в растворе электролита. Затем, изменяя плотность последнего, добиваются всплытия неметаллических включений с их последующим удалением. Полученная таким способом руда обладает большей чистотой и может быть отправлена на переплавку непосредственно после процесса сепарации. Эта идея была предложена еще в 60-х гг, однако эффективное промышленное устройство так и не было создано. Вместе с тем для решения данной проблемы необходимо чтобы выбрать наилучшую конструкцию и методику применения электромагнитной силы.

Работа [6], выполненная на водном растворе поваренной соли, экспериментально показала возможность управления всплытием непроводящих частиц в жидком электролите. Прозрачность и текучесть растворов электролитов при комнатных температурах позволяет создать привлекательную среду для исследования магнитогидродинамических (МГД) течений при помощи как оптических [7, 8], так и электромагнитных методов [9].

Развитие технологии жидкометаллических батарей не только усилило интерес к изучению течений электролитов в качестве среды, моделирующей жидкие металлы (текучесть, электропровод-

ность) [8], но и самостоятельного элемента МГД системы [7, 10].

В работе экспериментально исследуется течение водного раствора калийной щелочи в плоском канале под действием электромагнитных сил применительно к задаче сепарации непроводящих включений. Генерация силы производится за счет пропускания электрического тока через раствор, помещенный во внешнее постоянное магнитное поле. Действие электромагнитной силы позволяет добиться локализации частиц примеси и исключения их из основного потока.

2. Экспериментальная установка

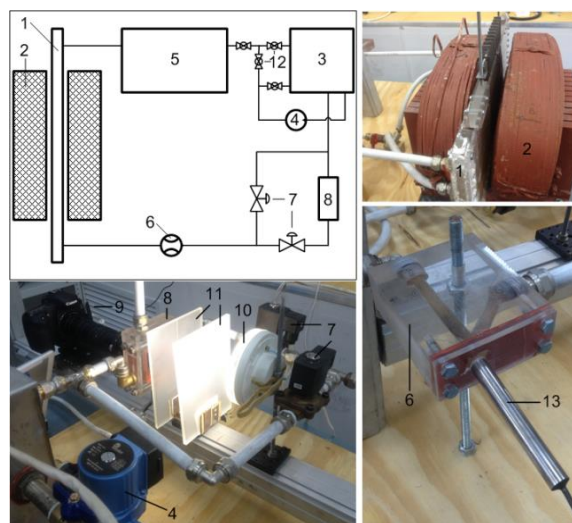


Рис. 1. Схема и фотографии экспериментальной установки: 1 – сепарационный канал, 2 – электромагнит, 3 – расходный бак, 4 – циркуляционный насос, 5 – переливной бак, 6 – расходомерная ячейка, 7 – электроклапаны, 8 – измерительная ячейка, 9 – фотокамера, 10 – источник света, 11 – матовые стекла, 12 – регулирующие вентили, 13 – датчик УДА

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из сепарационного плексигласового канала 1, помещенного между полюсами электромагнита 2. На вход канала из расходного бака 3 циркуляционным насосом 4 через переливной бак 5 подается раствор электролита. После канала 2 жидкость по трубопроводу поступает в расходомерную ячейку 6, после которой, в зависимости от положения автоматических электромагнитных клапанов 7, она направляется либо в измерительную ячейку 8 (после нее жидкость поступала обратно в расходный бак 3), либо в обход ее сразу в расходный бак 3. Последний режим был необходим для фоторегистрации частиц в жидкости в измерительной ячейке при помощи зеркального фотоаппарата 9 с компьютерным управлением при значительных (более 5 см/с) скоростях проточного течения электролита через систему. Подсветка измерительной ячейки осуществлялась светодиодным источником све-

та 10, рассеянного через матовые стекла 11. Расход жидкости в системе задавался положением регулирующих вентилей 12 и определялся ультразвуковым доплеровским анемометром (УДА) 13 Signal Processing Switzerland DOP 2000.

Сепарационный канал (рис. 2) представляет собой плоскую прямоугольную кювету 1 с рядом удерживающих перегородок 2, задерживающих сепарированную примесь в области 3, с двумя медными электродами 4 для пропускания тока вдоль кюветы, а также с выравнивателями потока 5, которые представляют собой утолщенные перегородки с отверстиями 6. Сепарационный канал располагается между полюсами электромагнита 7. Вертикальные перегородки 2 выполнены из проводящего электрический ток металла. В канал жидкость поступает через штуцер 8, а выходит через аналогичный штуцер 9. Выравниватели потока 5 установлены в местах расположения краев сердечника электромагнита для предотвращения образования вихрей под действием неоднородного магнитного поля в этих областях.

Электрический ток, проходя через электролит, взаимодействует с внешним постоянным магнитным полем, создаваемым электромагнитом, состоящим из ферромагнитного магнитопровода 10 и двух катушек 11. Катушки подключены последовательно для увеличения величины магнитного поля в зазоре. Направление электрического тока выбирается таким, чтобы возникающие электромагнитные силы приводили к затягиванию и удерживанию примеси внутри области. Направление электрического тока также зависит от физических свойств примеси.

В случае непроводящей примеси направление электрического тока выбирается таким, чтобы электромагнитная сила действовала вертикально вниз. При этом сила действует только на проводя-

щую электричество среду, производя её квазиутяжеление. На примесь в области между полюсами магнита 7 действует выталкивающая вверх сила, электромагнитный аналог силы Архимеда, вследствие чего примесь поднимается в область 3 с перегородками 2 и удерживается там. Дополнительно в области размещения электродов устанавливаются вертикальные сетки 13 из непроводящего материала, задерживающие пузырьки газа, образующиеся на электродах в процессе электролиза. Отсутствие таких сеток приводит к попаданию большого количества пузырьков в зону сепарации и снижает её эффективность.

Питание электромагнита осуществлялось источником постоянного тока HEIDEN power GmbH HE-LAB/HP15150. Ток через электролит создавался источником постоянного тока MASTECH DC Power Supply HY 3005-2. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор калийной щелочи. Примесью служили карбоновые частицы размером от 10 до 300 мкм.

Перед началом опытов была измерена зависимость магнитного поля в зазоре электромагнита от величины тока в питающих катушках. Измерения магнитной индукции производились с помощью тесламетра Lake Shore 421 Gaussmeter. Полученная зависимость имеет линейный характер и может быть аппроксимирована уравнением вида

$$B = 0.023I + 0.005. \quad (1)$$

Особого внимания заслуживает метод пропускания тока через щелочной раствор. Вследствие сложных электрохимических процессов существует порог по напряжению, до достижения которого электрический ток через раствор не течет. Было обнаружено, что при регулировке силы подаваемого от источника тока (при постоянном заданном

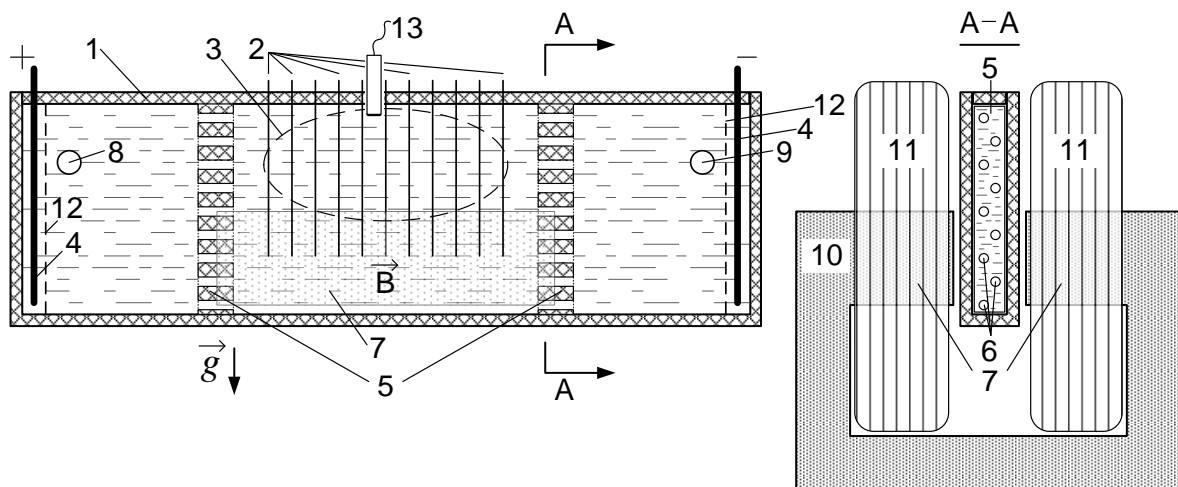


Рис. 2 Схема сепарационного канала установки: 1 – сепарационный канал, 2 – удерживающие перегородки, 3 – область аккумуляции частиц примеси, 4 – медные электроды, 5 – выравниватели потока с отверстиями 6, 7 – полюса электромагнита, 8 – входной штуцер, 9 – выходной штуцер, 10 – магнитопровод, 11 – катушки электромагнита, 12 – приэлектродные сетки, 13 – датчик УДА

напряжении) проявляется своеобразный гистерезис: электрический ток не течет через раствор до значения прикладываемого тока 1.7 А. По достижении этой величины ток начинает протекать через раствор пороговым образом. При уменьшении прикладываемого тока раствор теряет проводимость при значении 0.7 А. В то же время при задании постоянного тока на источнике и плавном изменении напряжения удаётся достигнуть значений электрического тока, протекающего через раствор, вплоть до 0.1 А. При этом существует порог по напряжению около 3 В, до достижения которого электрический ток через раствор не течет.

Концентрация щелочного раствора была определена по его плотности при помощи ареометра. Полученная плотность среды (с учетом примеси карбоновых частиц) составила $1.144 \pm 0.001 \text{ г/см}^3$. Согласно таблице плотностей растворов КОН концентрация щелочи составляет приблизительно 16 %. Измеренная концентрация почти в два раза меньше расчетной, что связано со способностью щелочи впитывать влагу из воздуха. По причине недостаточной концентрации (а, следовательно, и плотности) модельные частицы не взвешены в щелочи и оседают под действием силы тяжести. Плотность частиц составляет $1.20\text{--}1.25 \text{ г/см}^3$. С целью предотвращения полного оседания частиц примеси раствор механически перемешивается в основном и переливном баке при помощи лопастей, вращаемых электроприводами.

Скорость звука в щелочном растворе для корректного измерения скорости потока при помощи УДА определялась в отдельном эксперименте и составила 1778 м/с.

3. Методика определения концентрации

Концентрация частиц примеси определялась в экспериментах двумя методами: оптическим и ультразвуковым. В первом случае измерения проводились в измерительной ячейке при помощи фотокамеры Canon EOS 60D. Ячейка представляла собой U-образный каркас из плексигласа с каналами в нижней части, обеспечивающими проточное течение щелочи. С широких сторон жидкость была ограничена стенками из расположенных параллельно друг другу кремниевых стёкол. Верхняя поверхность была свободной, обеспечивая возможность удаления

пузырьков газа, образовавшихся при электролизе и затянутых в измерительную ячейку проточным течением. Слой щелочи в ячейке просвечивался излучением от светодиодной лампы. Свет пропускаться через три матовых стекла для обеспечения равномерности освещенности и избавления от зон засветки вокруг светодиодов. Толщина слоя щелочи в ячейке составляла 10 мм. Глубина резко изображаемого пространства составляла при этом 2 мм. В ходе опытов наводка фотокамеры по резкости устанавливалась на положение, среднее между двумя стеклами. То есть рассматривалась срединная область измерительной ячейки, отвечающая наиболее интенсивному проточному течению. Съёмка производилась с выдержкой 1/100 с, светочувствительностью 800 ISO при диафрагме 7° . В силу малой скорости проточного течения (10–15 мм/с) смещение частиц примеси за время получения кадра оказывалось недостаточным для заметного ухудшения качества изображений. Частота съёмки фотокамерой составляла 2 кадра в минуту при общей продолжительности опыта 90 мин. Полученные кадры подвергались цифровой обработке для получения относительного значения концентрации примеси. В первую очередь из фотографии вырезалась квадратная область, для которой в дальнейшем и происходила обработка. Полученное изображение из полноцветного RGB конвертировалось в двумерный массив оттенков серого. Затем эмпирически подбиралось значение уровня отсечки при преобразовании массива в бинарную форму. Критерием выбора служило требование различить максимально мелкую фазу примеси и при этом сохранить изображение достаточно ярким для возможности локализации отдельных частиц. После обработки изображения подсчитывалось общее количество примеси (единичных значений, отвечающих наличию частиц) на нулевом фоне.

Рис. 3 иллюстрирует стадии обработки фотографий. В результате процесса обработки серии фото получалась зависимость относительной концентрации частиц примеси от времени в долях отношения площади, занимаемой частицами на фото к общей площади фото. Пример графика, полученного при гравитационном осаждении частиц, приведен на рис. 4.

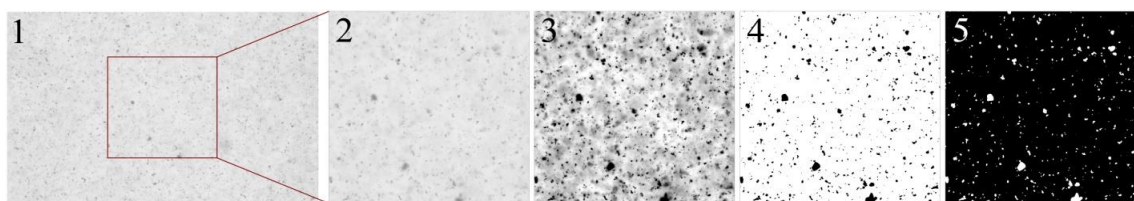


Рис. 3. Пример обработки фотографий течения щелочи: 1 – исходное фото, 2 – выделенная область обработки, 3 – изображение в оттенках серого, 4 – бинаризованное изображение, 5 – инвертированное бинаризованное изображение

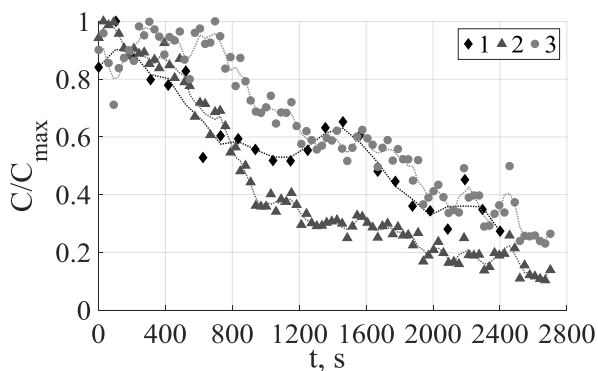


Рис. 4. Изменение концентрации примеси при осаждении в щелочи, полученное двумя методами: 1 – ультразвуковые измерения, 2 – оптические измерения, 3 – пофракционный анализ

Второй метод измерения концентрации основан на использовании ультразвука и анализа отраженного от частиц примеси сигнала эха. Измерения проводились при помощи ультразвукового доплеровского анемометра.

При прохождении через дисперсную среду звук рассеивается на взвешенных в среде частицах. При этом происходит частичное отражение звуковой волны в направлении, противоположном направлению изначального движения. Отраженный звук в силу множественных переотражений на дисперсной фазе обладает меньшей интенсивностью и большим набором частот. Таким образом, степень рассеяния звука в многофазной среде коррелирует с концентрацией примеси и может использоваться для измерения последней. В ходе работы была впервые разработана методика, позволяющая восстанавливать относительную концентрацию дисперсной фазы в щелочи по записанному УДА сигналу ультразвукового эха. Датчик УДА размещался вертикально в измерительной ячейке за пределами области съёмки фотокамерой. Задание минимальной энергии ультразвуковой волны позволяло нивелировать генерацию течения в щелочи за счет звукового давления и скачков акустического сопротивления на границах жидкость/твёрдая частица.

Измерение скорости при помощи УДА основывается на излучении и принятии ультразвуковых импульсов заданной несущей частоты [11]. После принятия сигнала отраженного ультразвукового импульса происходит корреляционный анализ, сравнивающий полученные импульсы между собой и с излученным сигналом. На основе этого анализа определяется сдвиг частоты импульса, а, следовательно, и скорость движения среды. Программное обеспечение УДА DOP 2000 позволяет записывать для дальнейшей обработки не только измеренные профили скорости, но и «сырой» сигнал эха. Полученный профиль эха интегрировался вдоль ультразвукового луча в каждый отдельный

момент времени (акт измерения), давая временной ряд общей интенсивности отраженного в дисперсионной среде ультразвука. Из полученного ряда вычитался тренд и определялся среднеквадратичный уровень колебаний интенсивности ультразвука. Было обнаружено, что изменение уровня пульсаций интегрального эха со временем имеет хорошее качественное сходство с аналогичной концентрационной зависимостью. Соответствующее сравнение нормированных на единицу концентраций, рассчитанных по оптическим и ультразвуковым измерениям, приведено на рис. 4.

Поскольку УДА измеряет и выводит уровень принятого ультразвукового эха во внутренних условных единицах, для пересчета относительной концентрации в абсолютную требуется экспериментально найти размерный нормировочный коэффициент. Для того чтобы объяснить наблюдаемое различие кривых 1 и 2 при $t > 700$ с, был проведен дополнительный пофракционный анализ фотографий. В бинарном изображении стандартными программными средствами находились положения отдельных частиц примеси, подсчитывались их размер и положение. Полученные данные разделялись по наперёд заданным диапазонам размеров частиц. При этом из рассмотрения исключались частицы с эффективным радиусом меньше 1.33 мкм (предел разрешения фотоаппарата) и больше 263 мкм. Верхний предел выбран таким образом, чтобы исключить из рассмотрения коагулированные частицы и мусор. Кривые изменения концентраций отдельных фаз со временем складывались с соответствующими весами для получения итоговой зависимости. Отличие итоговых концентрационных кривых на начальном участке (до 800 с) обуславливается преимущественным вкладом мелкой фракции, быстро всплывающей под действием электромагнитных сил. Порог отсечки бинаризации изображения в оптическом методе несколько выше, чем в пофракционном анализе, что занижает значение концентрации кривой 2 по сравнению с кривой 3. Дальнейшее спадание концентрации, полученной из оптического метода, обусловлено сепарацией крупной фракции, а именно коагулированных частиц, которая исключается в пофракционном анализе. Наиболее крупные частицы вносят основной вклад в затемнение изображения при оптическом анализе, поэтому кривая 2 спадает значительно быстрее кривых 1 и 3. Хорошее согласие кривых 1 и 3 на временах более 800 с объясняется рассеянием ультразвука преимущественно на мелкой фракции.

4. Течение в сепарационном канале

С целью изучения структуры течений, возникающих в щелочном растворе в сепарационном канале под действием электромагнитных сил, в канале размещался датчик УДА. Измерения прово-

дились при двух направлениях протекания электрического тока через канал, соответствующих случаю сонаправленности и противоположенности электромагнитной силы и силы тяжести. В дальнейшем будем называть эти случаи положительным и отрицательным направлением протекания тока. Течение в вертикальной плоскости сепарационного канала осуществлялось на фоне транзитного течения в горизонтальной плоскости. В обоих случаях вертикальная составляющая потока порождалась взаимодействием наложенного на жидкость постоянного магнитного поля с индукцией 0.235 Тл и пропускаемого вдоль канала электрического тока величиной ± 1.7 А. Знак выбирался в зависимости от выбора направления действия электромагнитной силы.

Датчик УДА позволяет измерять лишь компоненту, направленную вдоль ультразвукового луча. Для изучения структуры потока в вертикальной плоскости датчик размещался перпендикулярно свободной поверхности раствора между соседними удерживающими перегородками (рис. 2). Датчик погружался в электролит на глубину 3 – 5 мм, достаточную для предотвращения скачка акустического сопротивления на границе жидкость/газ, ведущего к ухудшению качества измерений.

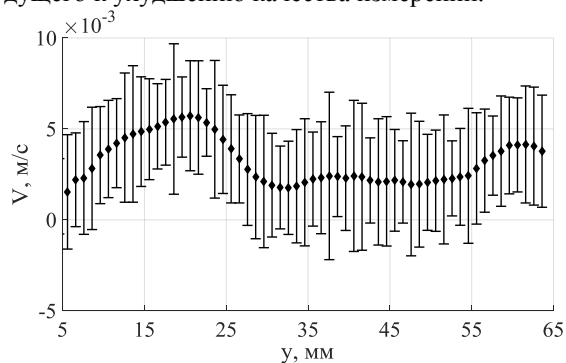


Рис. 5. Средний профиль вертикальной составляющей скорости течения щелочи в сепарационном канале при положительном направлении протекания тока по раствору. Вертикальные линии отмечают амплитуду колебаний скорости

При положительном направлении протекания тока в растворе возникает сила, генерирующая в вертикальной плоскости течение с высокой интенсивностью у дна и свободной поверхности жидкости. Средний по времени профиль скорости с отмеченной амплитудой колебаний приведён на рис. 5. Как видно из рисунка, во всей области охватываемой ультразвуковым лучом, скорость имеет одно направление. Можно предположить, что течение имеет структуру, схожую с конвективным факелом.

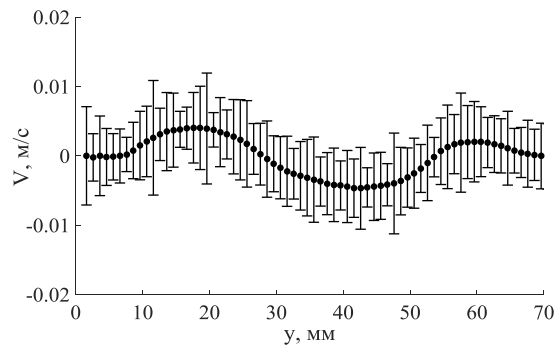


Рис. 6. Средний профиль вертикальной составляющей скорости течения щелочи в сепарационном канале при отрицательном направлении протекания тока по раствору. Вертикальные линии отмечают амплитуду колебаний скорости

При отрицательном направлении протекания электрического тока электромагнитная сила в растворе направлена противоположно силе тяжести, и в канале создаётся слабое трёхвихревое течение с выраженными колебаниями. На рис. 6 приведен средний профиль скорости при отрицательном направлении протекания тока в сепарационном канале. Вывод о наличии вихрей разной закрутки сделан на основании того, что скорость вдоль ультразвукового луча дважды меняет знак.

5. Сепарация примеси

Как было отмечено выше, наложение на проводящую среду с взвешенными в ней частицами электромагнитной силы может приводить к разделению фаз. В ходе опытов по сепарации модельной примеси изучалось влияние возникающего под действием электромагнитной силы течения на процесс локализации примеси и исключения её из основного транзитного потока.

При положительном направлении протекания электрического тока в сепарационном канале возникающее подъёмное течение приводит к выносу частиц примеси в область, ограниченную задерживающими перегородками. По-видимому, вихрь, локализованный около свободной поверхности, аккумулирует в себе подносимые подъёмным течением частицы и предотвращает их возврат в основной транзитный поток. В результате происходит перераспределение примеси в системе: жидкость, обогащённая карбоновыми частицами, удерживается в сепарационном канале, а циркуляцию продолжает обеднённый частицами раствор. Кривая изменения концентрации со временем приведена на рис. 7. Как видно из графика, за 90 мин концентрация примеси уменьшилась почти в 8 раз.

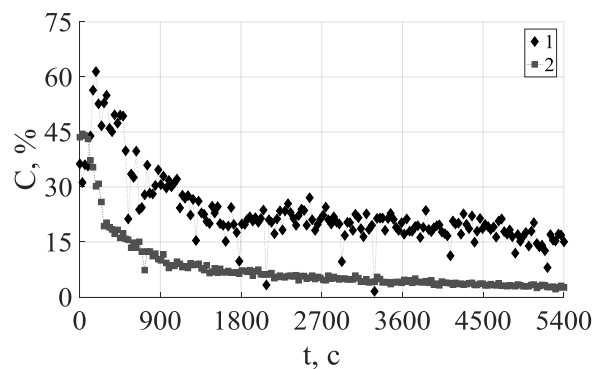


Рис. 7. Изменение концентрации примеси со временем: 1 – при отрицательном, 2 – при положительном направлении протекания электрического тока в щелочном растворе.

При отрицательном направлении протекания электрического тока совокупное влияние «увеличенной» силы тяжести и порождаемого электромагнитной силой течения приводит к стабилизации взвешивания модельных частиц в щелочном растворе с дополнительным малоинтенсивным перемешиванием. В результате снижение концентрации вследствие гравитационного осаждения частиц замедляется. Рис. 7 демонстрирует сравнение концентрационных кривых при положительном (сепарация) и отрицательном (слабое гравитационное осаждение) направлениях протекания электрического тока в канале. Повышение концентрации на начальном отрезке времени при отрицательном направлении протекания электрического тока связано с частичным переброном частиц в зону транзитного течения внешней силой.

6. Заключение

В ходе работы изучался процесс сепарации твёрдой примеси в водном растворе электролита в плоском канале под действием электромагнитных сил. Была успешно разработана и применена методика определения концентрации на основе ультразвуковых измерений. Полученные концентрационные кривые находятся в хорошем согласии с результатами оптических измерений.

Установлено, что квазиутяжеление, вызванное протеканием по электролиту постоянного электрического тока в присутствии поперечного постоянного магнитного поля, позволяет организовать повышение концентрации примеси в специально организованных застойных зонах, очищая основной поток от дисперсной фазы. Несмотря на то, что классическая схема электромагнитного сепаратора предполагает неподвижность жидкости, установлено, что слабое транзитное течение (оптимальная скорость 2–3 см/с) через сепарационный канал данной конфигурации оказывает незначительное влияние на эффективность разделения фаз.

Возникающее в вертикальной плоскости течение, обнаруженное при помощи датчиков УДА, не мешает процессу сепарации при параметрах, отвечающих рабочему режиму.

Однако при инверсном направлении протекания электрического тока перемешивание, обусловленное возникающими вихревыми течениями, препятствует естественному гравитационному осаждению и может использоваться для повышения качества перемешивания дисперсных проводящих сред. Возникающие структуры течения препятствуют повышению концентрации примеси в застойных зонах внутри перегородок и способствуют гомогенизации распределения примеси во всём объёме сепарационного канала, предотвращая сепарационные эффекты.

А.М. благодарит за поддержку Фонд Содействия Инновациям (договор № 8953ГУ/2015, код 0019710, конкурс УМНИК 15-11) при выполнении работы. И.К. и Г.Л. благодарят за поддержку грант РФФИ 17-48-590539 при выполнении работы.

Список литературы

1. Han J., Xiao J., Qin W., Chen D., Liu W. Copper Recovery from Yulong Complex Copper Oxide Ore by Flotation and Magnetic Separation. JOM. 2017. Vol. 69. P. 1563–1569.
2. Xu, Z.; Li, T. & Zhou, Y. Continuous removal of nonmetallic inclusions from aluminum melts by means of stationary electromagnetic field and DC current // Metallurgical and Materials Transactions A. 2007. Vol. 38. P. 1104–1110.
3. Поев И. Л., Кануста А. Б., Чекин Б. В. Магнитная гидродинамика в металлургии // М.: Металлургия, 1974. 240 с.
4. Страдомский Ю. И., Филиппов В. А. Проектный расчет магнитожидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов // Электромеханика и магнитожидкостные устройства. 2017. Т. 3. С. 211–214.
5. Leenov D., Kolin A. Theory of Electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // Journal of Chemical Physics. 1954. Vol. 22, N. 4. P. 683–688.
6. Park J.P., Tanaka Y., Sassa K., Asai Sh. Elimination of tramp elements in molten metal using electromagnetic force // Magnetohydrodynamics. 1996. Vol. 32, N. 2. P. 227–234.
7. Takeuchi J., Satake Sh., Morley N. B., Kunugi T., Yokomine T., Abdou M. A. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe // Fusion Engineering and Design. 2008. Vol. 83 P. 1082–1086.
8. Afshar M. R., Aboutalebi M. R., Guthrie R. I. L., Isac I. Modeling of electromagnetic separation of inclusions from molten metals // International

- Journal of Mechanical Sciences. 2010. Vol. 52. P. 1107–1114.
9. Andreev O., Habersroh Ch., Thess A. MHD flow in electrolytes at high Hartman numbers // *Magneto-hydrodynamics*. 2001. Vol. 37, N. 1–2. P. 151–160.
 10. Smolentseva S., Morleya N., Freezea B., Miraghaiea R., Naveb J.-C., Banerjeeb S., Yinga A., Abdoua M. Thermofluid modeling and experiments for free surface flows of low-conductivity fluid in fusion systems // *Fusion Engineering and Design*. 2004. Vol. 72. P. 63–81.
 11. Poelma C. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review // *Experiments in Fluids*. 2017. Vol. 58, 3.
- References**
1. Han J., Xiao J., Qin W., Chen D., Liu W. Copper recovery from yulong complex copper oxide ore by flotation and magnetic separation. *JOM*, 2017, vol. 69, pp. 1563–1569.
 2. Xu Z., Li T., Zhou Y. Continuous removal of non-metallic inclusions from aluminum melts by means of stationary electromagnetic field and DC current. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, vol. 38, pp. 1104–1110.
 3. Povh I. L., Kapusta A. B., Chekin B. V. *Magnitnaya gidrodinamika v metallurgii*. Moscow: Metallurgy, 1974. 240 p. (In Russian).
 4. Stradomskij Yu. I., Filippov V. A. Proektnyj raschet magnitozhidkostnogo separatora dispersnyh nemagnitnyh materialov. *Elektromekhanika i magnitozhidkostnye ustrojstva*, 2017, vol. 3, pp. 211–214 (In Russian).
 5. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles. *Journal of Chemical Physics*, 1954, vol. 22, no. 4, pp. 683–688.
 6. Park J.P., Tanaka Y., Sassa K., Asai Sh. Elimination of tramp elements in molten metal using electromagnetic force. *Magneto-hydrodynamics*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 227–234.
 7. Takeuchi J., Satake Sh., Morley N. B., Kunugi T., Yokomine T., Abdou M. A. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe. *Fusion Engineering and Design*, 2008, vol. 83, pp. 1082–1086.
 8. Afshar M. R., Aboutalebi M. R., Guthrie R. I. L., Isac I. Modeling of electromagnetic separation of inclusions from molten metals. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, vol. 52, pp. 1107–1114.
 9. Andreev O., Habersroh Ch., Thess A. MHD flow in electrolytes at high Hartman numbers. *Magneto-hydrodynamics*, 2001, vol. 37, no. 1–2, pp. 151–160.
 10. Smolentseva S., Morleya N., Freezea B., Miraghaiea R., Naveb J.-C., Banerjeeb S., Yinga A., Abdoua M. Thermofluid modeling and experiments for free surface flows of low-conductivity fluid in fusion systems. *Fusion Engineering and Design*, 2004, vol. 72, pp. 63–81.
 11. Poelma C. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review. *Experiments in Fluids*, 2017, vol. 58, 3

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мамыкин А. Д., Лосев Г. Л., Колесниченко И. В. Воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 1 (39). С. 46–53. doi: 10.17072/1994-3598-2018-1-46-53

Please cite this article in English as:

Mamykin A. D., Losev G. L., Kolesnichenko I. V. Influence of electromagnetic force on two-phase medium // Bulletin of Perm University. Physics, 2018, no. 1 (39), pp. 46–53. doi: 10.17072/1994-3598-2018-1-46-53