

ТЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА С ТВЕРДОЙ НЕПРОВОДЯЩЕЙ ПРИМЕСЬЮ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

У. Ц. АНДРЕС, Г. А. ВИТКОВ, И. И. ОРЛОВ

(Москва, Калинин)

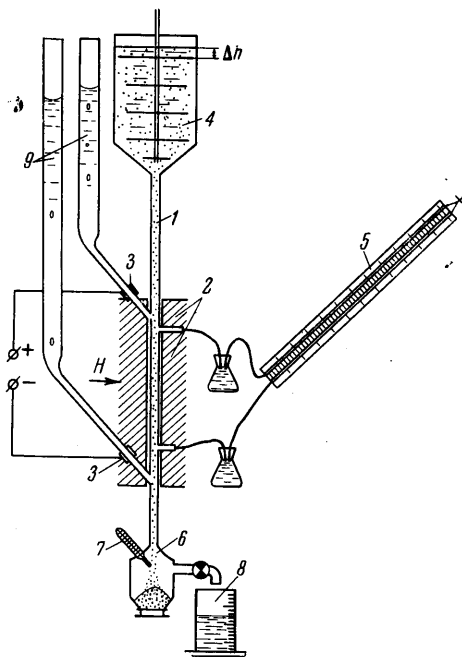
Исследование течений проводящей жидкости в скрещенных электрическом и магнитном полях остается до настоящего времени не затронутым разделом магнитной гидродинамики. На фоне обширных исследований течения проводящих жидкостей в магнитном поле [1-3] информация о поведении электролита в скрещенных полях почти отсутствует.

Не имеется работ о течении электролитов с инородной примесью ни в чисто магнитном и электрическом, ни в скрещенных полях. Между тем, названные вопросы существенны не только для расширения представлений о течении жидкостей и двухфазных сред при воздействии на них специфических электромагнитных пондеромоторных сил, но и для решения целого ряда технических проблем, связанных с МГД-сепараторами зернистых смесей [4] и некоторыми другими задачами современной техники.

Для выявления особенностей течения жидкости одним из наиболее простых и надежных экспериментальных методов является построение кривых течения, представляющих собой зависимость коэффициента сопротивления от кинематического или динамического параметров движения жидкости (скорости, давления); этот метод широко развит в гидродинамике неньютоновских жидкостей, при исследовании шероховатости труб [5], а также был применен Гартманом [6] в исследовании течения ртути в поперечном магнитном поле.

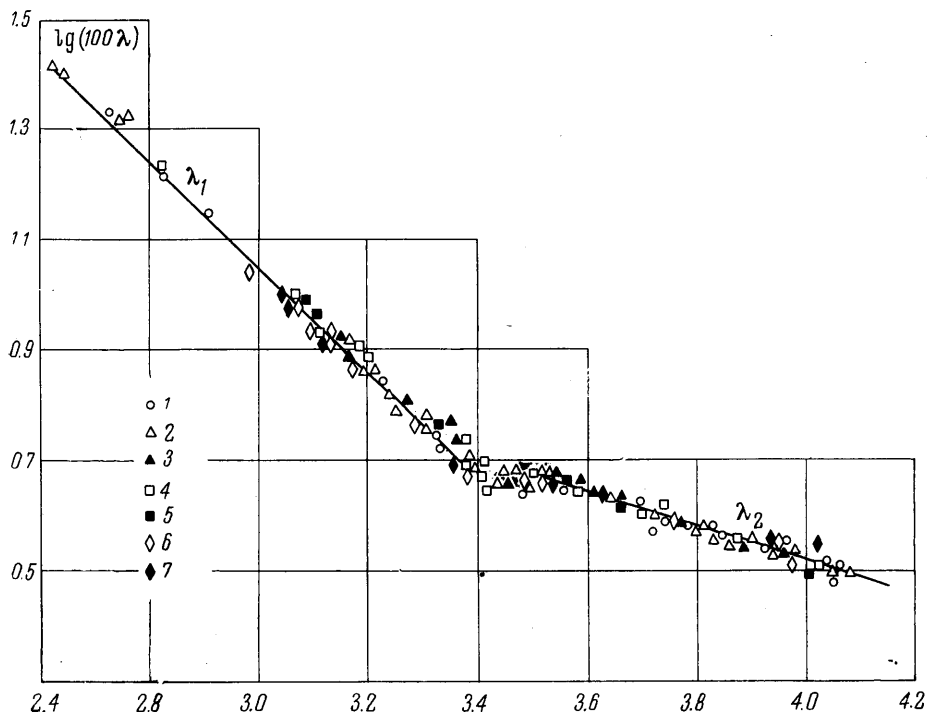
На фиг. 1 показана схема экспериментальной установки для исследования течения двухфазных сред в скрещенных электрическом и магнитном полях. Трубка 1 диаметром 4.62 мм помещалась в воздушный зазор электромагнита 2 с размерами $300 \times 50 \times 25$ мм, магнитное поле которого с индукцией от 0.6 до 2.0 тл направлено перпендикулярно оси трубки. Электрическое поле образуется двумя кольцевыми электродами 3, между которыми протекает постоянный ток с плотностью от 0 до $36 \cdot 10^3$ а/м². Сопротивление характеризуется перепадом давления на мерном участке 250 мм и фиксируется наклонным микроманометром 5. Для измерения концентрации твердой непроводящей примеси (кварцевого песка с зернами от 0.15 до 0.5 мм), подаваемой в трубку через мешалку 4, используется ловушка 6, в которую вмонтирован термометр 7 для контроля температуры. Расход электролита (водного раствора серной кислоты) контролируется мерной емкостью 8. Для исключения влияния пузырьков газа, выделяемого при электролизе, на течение суспензии в трубках с электродами предусмотрены газоотводные участки 9.

Первой задачей, которая решалась на вышеописанной экспериментальной установке, было выяснение специфичности течения чистого электролита в скрещенных электрическом и магнитном полях. Наличие скрещенных полей приводит к тому, что кроме силы тяжести на жидкость действует дополнительная электромагнитная (пондеромоторная) сила, направленная перпендикулярно к плоскости, содержащей векторы напряженности электрического E и магнитного H полей. Численная величина этой объемной силы, направленной в рассматриваемом случае перпендикулярно плоскости фиг. 1, определяется [6] величиной $f = (\mu\sigma/c)[E \times H]$, где μ — магнитная проницаемость электролита, σ — его электропроводность (см.см.)⁻¹, E в в/см, H в гс.



Фиг. 1

На фиг. 2 приведены результаты измерений перепада давления на измерительном участке трубки в зависимости от скорости течения (в терминах Никурадзе) для различных величин пондеромоторной силы, которая достигала более чем двухкратного значения силы тяжести. Точки, обозначенные цифрой 1, соответствуют нулевому значению пондеромоторной силы, 2 — 0.195, 3 — 0.390, 4 — 0.78, 5 — 1.17, 6 — 1.76,



Фиг. 2

7 — 2.34 дин/см^3 . По оси абсцисс отложены логарифмы чисел Рейнольдса, а по оси ординат — логарифмы 100λ ($\lambda = 8grh/lv^2$). (Здесь r и l — соответственно радиус и длина трубки в см, v — скорость течения электролита в см/сек, h — перепад давления в см, g — ускорение силы тяжести в см/сек².) Как видно из фиг. 2, все полученные точки с достаточной точностью укладываются на прямые участки графика $\lambda_1 = 64/R$ и $\lambda = 0.3164/R^{0.25}$, соответствующие ламинарному и турбулентному режимам течения вязкой жидкости в круглых гладких трубках в условиях силы тяжести. Дополнительное давление на стенку трубки, вызванное действием пондеромоторной электромагнитной силы направление которой в экспериментах изменялось, не вызывает отклонения в графике зависимости сопротивления от скорости. Установление этого факта дает возможность рассчитывать гидравлические системы такого рода по обычной схеме для вязкой жидкости.

Принципиально отличный характер имеет течение электролита с твердой инородной (по проводимости или магнитной восприимчивости) примесью. Наличие такой примеси при нахождении суспензий в скрещенных полях вызывает локальные вихревые течения электролита [7]. Эти течения обусловлены анизотропией пондеромоторной силы в объеме жидкости из-за неоднородности в проводимости и магнитной восприимчивости, приводящей к локальным перепадам давления и вызывающей переток жидкости из области высокой плотности электромагнитных сил в область низкой плотности этой силы.

Течение электролита с твердой примесью в скрещенных электрическом и магнитном полях полностью характеризуется безразмерным параметром $A = fa^3/\rho v^2$ [8], представляющим собой отношение электромагнитных сил к вязким силам совместно с параметром концентрации этой примеси. (Здесь f — электромагнитная объемная сила, a — характерный размер частицы, ρ и v — плотность и кинематическая вязкость жидкости.) В этой связи переменными величинами в эксперименте были: а) электромагнитная сила, б) размер твердых частиц (песчинок) и в) концентрация твердой примеси.

Результаты экспериментов по течению этих двухфазных систем приведены на графиках фиг. 3. Эксперимент состоял так же, как и в случае с чистым электролитом, в получении данных для составления графиков течения суспензий в поле силы тяжести и в условиях совместного действия гравитационных и вихревых электромагнитных сил.

Значения электромагнитной силы в этом случае соответствовали для кривой 1 — нулю, для кривой 2 — 0.39, для кривой 3 — 1.17 и для кривой 4 — 2.34 дин/см^2 . Следует отметить, что при объемной концентрации 0.133 частиц с размером (0.15—0.25 мм) кривые течения этих суспензий при наличии скрещенных полей отклоняются от аналогичной кривой, полученной для течения в поле силы тяжести (фиг. 3, кривая 1). В случае наличия электромагнитной силы кривые течения идут не из нуля, а отсекают на оси ординат некоторый «начальный» напор, который с ростом концентрации твердой непроводящей примеси увеличивается.

График фиг. 4 соответствует измерениям в сильных магнитных полях, обеспечивающих уровень электромагнитной силы до 14,4 г/см^3 . Здесь величина

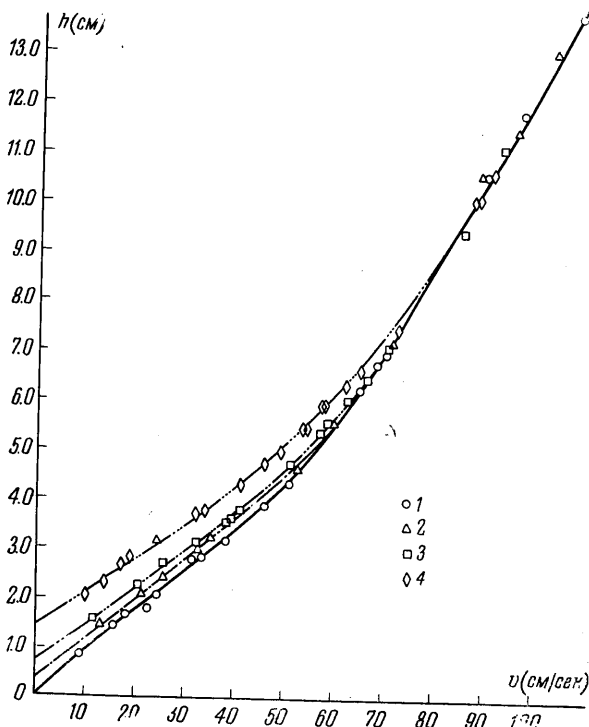
«начального» напора h достигла 140 мм. Кривая 1 соответствует величине пондеромоторной силы, равной нулю, 2 — 4.8, 3 — 9.6 и 4 — 14.4 г/см^3 .

Интересно отметить, что и характер изменения сопротивления от скорости в ламинарной зоне существенно отличается от случая действия только гравитационной силы. Если для вязкой жидкости при ее ламинарном течении в обычных условиях

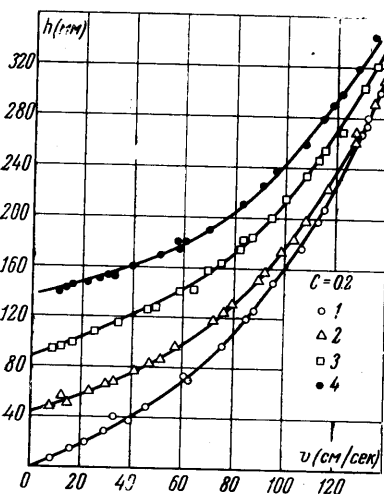
сопротивление пропорционально скорости в первой степени, то в рассматриваемом случае показатель степени зависит от величины электромагнитной силы, размера и концентрации твердой примеси, а также, очевидно, от плотности и вязкости электролита. В данных экспериментах показатель степени при значении скорости снижался до 0.3. Нетрудно себе представить, что его можно снизить и до 0, т. е. получить случай, когда сопротивление постоянно и не зависит от скорости. При дальнейшем увеличении параметра A или концентрации твердой примеси можно получить отрицательные значения показателя при скорости течения в законе сопротивления.

Описываемые кривые течения двухфазных систем в скрещенных полях по внешнему виду напоминают кривые для неньютоновских жидкостей и по форме являются промежуточными между аномально вязкими и бингамовскими жидкостями.

Течение неньютоновских жидкостей осложняется наличием более или менее жесткой структуры, нарушаемой при переходе через предельное значение напряжения сдвига. Подобную «жесткость» обнаруживают и проводящие суспензии в скрещенных полях.



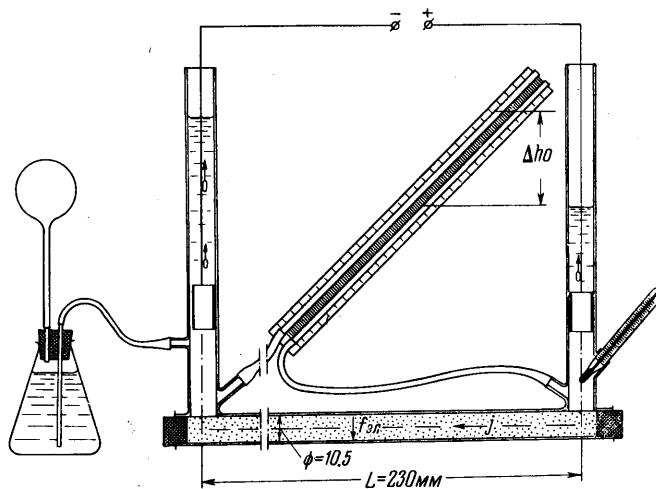
Фиг. 3



Фиг. 4

Подобную «жесткость» обнаруживают и проводящие суспензии в скрещенных полях.

Наличие жесткости может быть связано только с возникновением вихревых течений вокруг твердых частиц. Жидкость, в которой содержатся твердые непроводящие частицы, вокруг которых имеется вихревое течение электролита, обладает своеобразной вихревой структурой из взаимодействующих вихрей, жесткость которой возрастает с количеством частиц и интенсивностью вихрей вокруг них. Очевидно, для приведения в движение такой системы необходимо некоторое критическое давление.



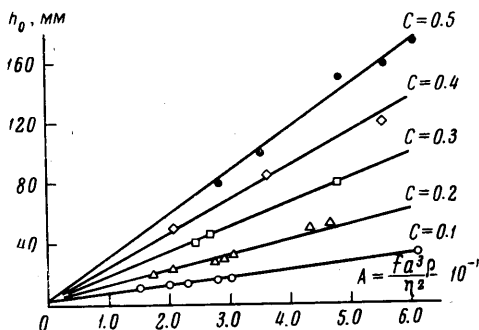
Фиг. 5

Своеобразие такой структуры состоит в том, что переход через предельное напряжение сдвига здесь связан не с разрушением связей внутри псевдокристаллического каркаса из сцепленных частиц твердой примеси, а с перестройкой взаимосвязанных вихревых течений, образующихся в связи с локальными неоднородностями, вносимыми частицами. Как следует из известной теоремы Гельмгольца, жидкость, образующая вихри, может перемещаться и обмениваться с окружающей жидкостью лишь молями, составляющими этот вихрь. Такая особенность вихревой структуры, естественно, затрудняет течение и препятствует развитию малых деформаций при любом сколь угодно малом напряжении, как это имеет место в обычной вязкой жидкости.

Для проверки этого предположения была создана специальная установка, показанная на схеме фиг. 5.

Горизонтальная трубка 1 с песком и электролитом помещалась в воздушный зазор горизонтального электромагнита. Электроды 3 подвешивались в вертикальных трубках 2. Перепад давления, образуемого при помощи колбы 5 с грушей, измеряется микроманометром 4. Трубка заполняется электролитом, температура которого фиксируется термометром 8. Сущность эксперимента состояла в том, что определялся перепад электролита, который удерживался в одном из колен, в которое подливался электролит, при наличии электромагнитной силы, действующей на суспензию.

Оказалось, что в зависимости от концентрации и величины электромагнитной силы уровень жидкости Δh_0 изменялся от 0 до 160 мм. Иными словами, вихревая структура суспензии в объеме трубки 1 выдерживала давление, создаваемое столбом жидкости в правом колене. Подобное же явление сохранялось, если жидкость заливалась не в левое, а в правое колено.



Фиг. 6

На графике (фиг. 6) показана зависимость величины превышения Δh_0 от параметра A для различных значений концентрации твердой фазы. Эксперименты огра-

ничивались малыми значениями электрического тока, вызывающего быстрый нагрев жидкости и даже ее кипение. В первом приближении указанная зависимость носит линейный характер.

Проведенные эксперименты наводят на мысль, что любое, в том числе и чисто механическое, но достаточно интенсивное вихревое течение, вызывает возникновение в жидкости своеобразной «структурной прочности».

Поступило 9 X 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Hartman J., Lazarus F. *Hg — dynamics*, II, Kgl. Danske Videnskabernes Selskab. *Math. fis. medd.*, Copenhagen, 1937, vol. 15, No. 7.
2. Murgatroyd W. Experiments on magneto-hydrodynamic channel Flow. *Phylos. Mag.*, 1953, vol. 44, No. 359.
3. Брановер Г. Г., Лиелаусис О. А. Об особенностях влияния поперечного магнитного поля на турбулентные течения жидкого металла при различных числах Рейнольдса. Вопросы магнитной гидродинамики, Изд. 3, стр. 59—65.
4. Андрес У. Ц. Магнитогидродинамическая сепарация зернистых смесей. Ин-т Цветметинформация, М., 1967, стр. 72.
5. Идельчик И. Е. Гидравлические сопротивления. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.
6. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Изд. 8, М., «Наука», 1966.
7. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetohydrodynamic forcocs experienced by spherical and symmetrically oriented gyendrical particles. *J. Chem. Phys.*, 1954, vol. 22, No. 1.
8. Андрес У. Ц., Полак Л. С., Сыроватский С. И. Электромагнитное выталкивание сферического тела из проводящей жидкости. *Ж. техн. физ.*, 1963, т. 33, № 3.

ОБ ЭФФЕКТЕ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБАХ ВОДОРАСТВОРИМЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

И. В. ГАЗУКО, В. А. ГОРОДЦОВ

(Москва)

Работой Томса 1948 г. [1] началось исследование влияния высокомолекулярных полимерных добавок на гидродинамическое сопротивление жидкостей. Эффект снижения сопротивления был обнаружен и исследовался при турбулентном течении многих водных растворов полимеров в гладких трубах. Оказалось, что небольшие добавки таких полимеров, как полиэтиленоксид, полиакриламид и гуаровая смола, могут понизить сопротивление в 2—3 раза. Аналогичное воздействие оказывают эти полимеры на течения между вращающимися дисками и цилиндрами, на обтекание тел внешним потоком.

Такой большой эффект снижения имеет место при турбулентном режиме течения и связан с перестройкой структуры турбулентности. Эксперименты с размыванием окрашенной струйки турбулентным потоком [2, 3] наглядно продемонстрировали гашение высокочастотных, мелкомасштабных турбулентных пульсаций полимерными добавками. Гасящее действие полимеров на возмущения сказывается и в затрудненном развитии вторичных течений. В работе [4] это было показано в случае рождения тейлоровских вихрей при течении полимерных растворов между вращающимися цилиндрами.

При сдвиговых турбулентных течениях возле ограничивающих поток твердых стенок мелкомасштабная турбулентность играет наибольшую роль в непосредственной близости от стенок в вязком подслое и в буферной, переходной зоне течения, на которую приходится максимум порождения и диссипации турбулентности. Вследствие указанного гашения полимерными добавками мелкомасштабных пульсаций можно ожидать, что будет увеличиваться маловозмущенная зона течения у стенки через подавление роста возмущений, при этом такая ламинаризация должна уменьшать сопротивление. Это было действительно установлено измерениями профиля средней скорости и сопротивления течению полимерного раствора в гладких трубах [5]. Более того, в исследовании [5] весь эффект снижения сопротивления связывается с утолщением вязкого подслоя.

С этой точки зрения полимеры можно рассматривать как эффективное средство воздействия на вязкий подслей, приводящее к его утолщению. Однако существуют и другие, ставшие уже классическими средства, такие, как шероховатость, отсос и т. п. Причем, например, шероховатость приводит, наоборот, к дестабилизации течения и утоньшению вязкого подслоя (вплоть до полного его уничтожения). Представляет интерес изучение совместного действия особенно таких противоположных фак-