

УДК 621.365.369.045

ХАЦЕВСКИЙ И.В.

Создание установок для электрофизической
обработки жидкостей в электромагнитных полях

Исследование и разработка методов расчета индукционных систем нагрева жидкостей [1] позволили создать электротехнологические установки принципиально нового типа, в которых с использованием электромагнитных полей за счет интенсификации электродиффузии и термодиффузии в десятки и сотни раз увеличивается скорость протекания различных химических реакций. Это позволяет осуществлять новые электротехнологические процессы: переработка жидких отходов, снижение жесткости воды, опреснение морской воды и т.д.

Общий анализ рабочих режимов обработки жидкости в рассматриваемых устройствах позволил выделить три одновременно протекающих взаимосвязанных процесса:

1. Нагрев и принудительное движение жидкости в рабочем объеме за счет перепада давлений жидкости на входе и выходе устройства.

2. Нагрев и конвективное движение жидкости при взаимодействии непосредственно с нагревающей поверхностью и реализацией различных режимов (нагрев в температурной области без насыщения, нагрев при объемном, поверхностном или пузырьковом кипении с одновременным протеканием термохимических процессов).

3. Движение катионов и анионов за счет объемно распределенных электромагнитных сил, действующих локально на паропроводящую смесь в рабочем пространстве индукционных систем нагрева (электромагнитное вихревое перемешивание), с одновременной интенсификацией термохимических процессов в электромагнитном поле. Рассмотрим последовательно эти

три процесса.

Принудительное движение жидкости за счет перепада давлений на входе и выходе нагревательного устройства определяет циркуляцию потока жидкости и интегральный теплообмен с коаксиальными цилиндрами. Основные принципы расчета и эффективность эксплуатационных характеристик индукционных нагревателей такого типа приведены в [1-4]. Теплообмен жидкости с нагревающими цилиндрами в этом процессе определяется законом Ньютона и, следовательно, коэффициентом теплоотдачи.

Интенсивность взаимодействия жидкости с нагревающей поверхностью зависит от удельной плотности теплового потока при теплообмене и определяет характер движения жидкости совместно с электродинамическими процессами непосредственно около поверхности нагрева (объемное или поверхностное кипение, нагрев без парообразования). Коэффициент теплоотдачи в этом случае зависит от характера взаимодействия с нагревающей поверхностью и, следовательно, целого ряда факторов: температур теплоотдающей поверхности $T_{нагр}$ и тепловоспринимающей среды T_n формы и геометрических размеров нагревающих стенок, характера конвективного движения жидкости со скоростью V_T , изменяющегося за счет действия электродинамических сил, возникающих при взаимодействии электропроводной воды с электромагнитным полем, физических свойств жидкости (теплоемкости (c), теплопроводности (λ), плотности (ρ), вязкости (η), одновременно зависящих от температуры). Величина теплового потока, поступающего в жидкость от нагревающей поверхности, в свою оче-

редь, определяется тепловыделением в короткозамкнутых витках индукционной системы нагрева и оценивается на основе решения уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепла [5]. Кинетика химико-термических процессов, протекающих в жидкости при ее нагреве, зависит от скорости нагрева и характера процессов, развивающихся в объеме жидкости, которые могут рассматриваться как дополнительные оптимизационные параметры для процессов снижения солесодержания в теплоносителе.

Одновременность протекания электротермохимических и теплофизических взаимодействий в нагреваемой воде определяет необходимость изучения влияния на эти процессы напряженностей электромагнитного поля и электродинамических сил, возникающих в гидродинамических потоках нагреваемой воды. В качестве модельного объекта исследований целесообразно рассматривать водопроводную воду со стандартным солесодержанием 6...7 мг-экв/кг.

Направленность термохимических процессов и интенсивность их протекания можно оценить на основе анализа эксплуатационных характеристик существующих и наиболее распространенных на практике систем нагрева воды. Отопительные электроустановки, выпускаемые промышленностью, обеспечивают нагрев воды при плотностях теплового потока $(2...8) \cdot 10^4$ Вт/м². Длительность безремонтного периода работы такой системы на основе трубчатых электронагревателей (ТЭН) ограничивается скоростью роста отложений (накипи) на поверхности нагревателя и при толщине отложений в 0,5 мм составляет 800...1000 часов. Электродные электродкотлы, в которых нагрев воды осуществляется за счет пропускания через воду электрического тока, сохраняют свои нагрузочные характеристики в течение 200...300 часов. Затем происходит снижение мощности из-за накопления на электродах отложений. Эти же процессы формирования отложений протекают в любой теплосети, включая системы централизованного теплоснабжения от ТЭЦ и котельных.

Химический анализ отложений показывает, что к основным составляющим относятся карбонатные соединения (Ca, Mg, Fe)·CO₃, сульфатные CaSO₄·3H₂O, гидроокиси магния Mg(OH)₂, оксиды железа в различных формах (гидроокиси Fe(OH)₃, Fe(OH)₂, гематиты Fe₂O₃, вюситы FeO), шпинелиды, магнетиты Fe₃O₄. Силикаты в отложениях встречаются как в виде безводных соединений, так и в виде гидратированных молекул.

Коррозионная агрессивность воды определяется содержанием диоксида углерода CO₂, кислорода O₂, сероводорода H₂S, окислов железа и ионов Cl и SO₄²⁻. Химический состав воды в системах отопления может изменяться в процессе эксплуатации за счет коррозии металла труб в теплосети, взаимодействия воды с воздухом и поступлением добавочной воды. Поэтому, несмотря на расход солей в процессе накипеобразования и формирования отложений в трубах, радиаторах и на нагревателях, коррозионная способность воды самовосстанавливается, а формирование отложений происходит непрерывно. Этому способствуют реакции окисления железа с образованием бикарбоната:

$Fe + 2CO_2 + 2H_2O = Fe(HCO_3)_2 + H_2$, с последующим образованием оксидов железа и вторичной двуокиси углерода: $4Fe(HCO_3)_2 + O_2 = 2Fe_2O_3 + 8CO_2 + 4H_2O$.

Проведенный анализ химико-термических процессов накипеобразования в замкнутых системах отопления показал, что особенно перспективным является создание устройства, которое бы не только обеспечивало нагрев воды, но и интенсифицировало проведение рассмотренных химических реакций до скоростей, превышающих скорость восстановления коррозионных способностей воды, с получением нерастворимых соединений в объеме нагреваемой воды без осаждения продуктов реакции на каких-либо поверхностях.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования на кафедре Автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского государственного технического университета [4] показали, что такой практический результат возможно получить при реализации электронагрева в режимах пузырькового кипения в индукционных системах с движущимися слоями воды, если обеспечить необходимые критические тепловые потоки и оптимальные напряженности электромагнитного поля в областях солеобразования. Взаимодействие пароводяной смеси с электромагнитным полем, величина электродинамических сил, возникающих при этом взаимодействии, во многом определяются скоростями движения и электропроводностью этой смеси, которая зависит от солесодержания и интенсивности теплофизических режимов нагрева воды.

Как установлено экспериментально [4], для интенсификации термохимических реакций в жидкости определяющим являются не столько абсолютные значения возникающих электродинамических сил, сколько вихревой характер поля этих сил. При этом скорости движения элементарных объемов жидкости должны быть соизмеримы со скоростями протекающих химических реакций в жидкости. Обеспечивая в цилиндрической системе индукционного нагрева оптимальный угол α между направлениями \vec{B}_a и $\vec{V}_g = f(z, r, \varphi)$ создаются условия трехмерного характера растекания тока, составляющие которого зависят как от \vec{B}_a , так и от \vec{V}_g .

При атмосферном давлении электропроводность паровой фазы значительно ниже электропроводности водяной фазы. Поэтому пароводяную смесь можно рассматривать как систему, состоящую из двух компонент – проводящей электрический ток (воды) и диэлектрика (пара). Электропроводность такой гетерогенной системы зависит от проводимости водяной фазы, объемного паросодержания и структуры пароводяной смеси. Для конкретной объемноодинаковой пароводяной смеси можно аналитически рассчитать электропроводность на основе теории Максвелла [6] для проводников с диэлектрическими включениями. Такой расчет обеспечивает достаточную точность, если паровая фаза (диэлектрик) присутствует в проводнике в виде равномерно распределенных шаровых пузырей одного размера при небольшом объемном содержании пара в смеси.

При реализации нагрева воды в индукционных системах проточного типа пароводяная смесь имеет сложную структуру, включающую пузыри размерами от долей миллиметра до миллиметра с последующим исчезновением после взаимодействия с менее нагретыми объемами воды. Кроме этого, температура воды и, следовательно, паросодержание в пароводяной смеси изменяется от входа потока воды в установку до ее выхода. Для таких сложных структур определять электропроводность пароводяной смеси можно только экспериментальным путем.

Пароводяная смесь и вода относятся к слабопроводящим (полупроводниковым) веществам и характеризуются ионной электропроводностью за счет диссоциации самой жидкости (собственная электропроводность) и примесей (примесная электропроводность). Удельное электрическое сопротивление воды и пароводяной смеси может изменяться в диапазоне от $5 \dots 10^3$ до $4 \dots 10^5$ Ом·м в зависимости от содержания

солей и пара. Поэтому интенсивность взаимодействия воды с электромагнитными полями будет менее ярко выражена, чем с электропроводными металлами. Однако экспериментально установлено, что локальное взаимодействие силового электродинамического поля и напряженностей электромагнитного поля на область насыщенных растворов при нагреве воды существенно увеличивает скорости образования нерастворимых в воде солей и, тем самым, обеспечивает снижение ее жесткости в индукционных системах нагрева.

В электротехнологиях практически не рассматривались электродинамические процессы в воде и других жидкостях с ионной электропроводностью, находящихся в электромагнитных полях индукционных систем нагрева. В связи с этим в настоящее время созданы экспериментальные установки, в которых повышение технологической эффективности осуществляется за счет интенсификации электродиффузии в рассматриваемых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чередниченко В.С. Индукционные нагреватели с электромагнитными экранами // Электричество. 1970, № 2. С. 40-44.
2. Чередниченко В.С. Расчет потерь энергии в кожухе индукционных электропечей // Электротермия. М.: Информэлектро, 1967. Вып. 98. С. 7-8.
3. Cherednichenko V.S., Ivlikov S.U., Inkin A.I. Calculation of induction heating system with coaxial cylinders design / Proceeding of the international seminar on Heating by Internal Sources. September 12-14, 2001. Padua (Italy): Servizi Grafici Editoriali, 2001. P. 481-486.
4. Хацевский К.В. Электронагрев жидкостей и газов в индукционных установках с коаксиальными цилиндрами. Павлодар: ЭКО, 2002.
5. Чередниченко В.С., Новиков Ю.П. Расчет тарельчатого аппарата для разделения и очистки металлов возгонкой в вакууме // Вакуумные процессы в цветной металлургии. Алма-Ата: Наука, 1971. С. 95-100.
6. Maxwell J.C. A treatise on Electricity and magnetism, Edition, Oxford Univ. Press, 1891.

УДК 621.315.616.9039.83

БЕНМАГАМБЕТОВА К.Х.

Высоковольтные кабели с изоляцией из полиимидных пленок

1 Изоляция высоковольтных кабелей
Электрическая изоляция силовых кабелей служит для изолирования токопроводящей жилы от жил других фаз и другого напряжения и заземленных оболочек кабеля. Радиальные размеры высоковольтных кабелей в значительной степени определяются толщиной изоляции. В целях уменьшения габаритных размеров и стоимостей кабелей выбирают достаточно высокие рабочие напряженности в электрической изоляции. В силовых кабелях широко применяются бумажно-масляная изоляция и изоляция из полиэтилена, поливинилхлоридного кабельного пластика, резины [1].

Широкое применение в кабелях находят полимерные материалы. Накладываемая экструзией на токопроводящую жилу полимерная изоляция не требует дорогостоящей свинцовой или алюминиевой оболочки. Наибольшее распространение в кабелях высокого напряжения получил полиэтилен. Полиэтилен имеет низкий $\tan \delta$ и небольшую относительную диэлектрическую проницаемость. Кратковременная электрическая прочность полиэтилена достигает в небольших толщинах 300-500 МВ/м. Однако при длительном приложении напряжения в полиэтилене развиваются ден-

дриты, завершающиеся пробоем изоляции. Дендриты развиваются от местных неоднородностей и загрязнений полиэтилена. Поэтому для увеличения долговечности изоляции кабеля полиэтилен необходимо тщательно очищать. Высокий температурный коэффициент линейного расширения полиэтилена ($0,00015-0,00018$ °C⁻¹) приводит к появлению в полиэтилене высоких механических напряжений при смене температуры, что вызывает снижение срока службы изоляции [1].

В настоящее время полиэтилен применяется в кабелях на напряжение до 220 кВ, а с изоляцией из сшитого полиэтилена до 500 кВ. В целях повышения нагревостойкости полиэтилен подвергают сшиванию, при котором линейная структура переходит в пространственную. Сшивание полиэтилена осуществляется либо его облучением электронами или γ -лучами, либо химическим путем. Радиационное сшивание полиэтилена дает более высокое качество материала, так как при этом не вносятся никаких добавок. Химическое сшивание полиэтилена осуществляется путем введения в него перекисных соединений, которые несколько снижают его электроизоляционные свойства.