УДК 697.244+621.3.082.1
DOI: 10.15587/1729-4061.2017.103868

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В СОВМЕЩЕННЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПРОЦЕССАХ

В. Е. Никольский
Доктор технических наук, профессор*
О. Ю. Олейник
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра компьютерно-интегрированных технологий и метрологии**
E-mail: oleinik_o@ukr.net
В. А. Яриз
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра оборудования химических производств**
E-mail: equipment_chem@udhtu.edu.ua
И. Л. Решентняк
Кандидат технических наук, доцент*
*Кафедра энергетики**
**Украинский государственный химико-технологический университет
пр. Гагарина, 8, г. Днепр, Украина, 49005

Аналітично і експериментально досліджено вплив магнітних і електричних полів з градієнтом напруги в напрямку руху контактуючих фаз газ-рідина. Виконано вибір найбільш ефективного методу впливу на процес тепломасообміну з метою підвищення енергоефективності апаратів погружного горіння. Запропоновано метод контролю коливань у контактуючих фазах газ-рідина з використанням вібраційного вимірювального перетворювача з циліндричним резонатором

Ключові слова: інтенсифікація тепломасообмінних процесів, магнітне і електричне поле, циліндричний резонатор, індукційний приймач

Аналитически и экспериментально исследовано влияние магнитных и электрических полей с градиентом напряжения в направлении движения контактирующих фаз газ-жидкость. Выполнен выбор наиболее эффективного метода воздействия на процесс тепломассообмена с целью повышения энергоэффективности аппаратов погружного горения. Предложен метод контроля колебаний в контактирующих фазах газ-жидкость с использованием измерительного преобразователя с цилиндрическим резонатором

Ключевые слова: интенсификация тепломассообменных процессов, магнитное и электрическое поле, цилиндрический резонатор, индукционный приемник

1. Введение

Интенсификация тепломассообмена в совмещенных газожидкостных процессах и аппаратах предоставляет возможность увеличить производительность аппаратов при уменьшении их габаритов, металлоемкости, стоимости, эксплуатационных расходов. Интенсификация позволяет получить новые эффекты соизмеримые, а иногда и превосходящие по значимости основные целевые эффекты (уменьшение инкрустации на внутренних поверхностях аппаратов, увеличение селективности химических процессов, уменьшение энергетических затрат) [1].

В настоящее время предложены и исследованы разнообразные методы интенсификации тепломассообмена. Для этой цели широко используются турбулизаторы потока на поверхности, закрутка потока завихрителями, установленными на входе в аппараты, подмешивание к потоку жидкости газовых пузырей, вращение или вибрация поверхности тепломассообмена, воздействие на поток электростатических, магнитных полей [2]. При этом эффективность интенсификации для разных способов при существенно различных затратах энергии различна и оценивается в каждом конкретном случае.

Аппараты погружного горения (АПГ) представляют собой особый класс газожидкостных тепловых устройств барботажного типа. Способ, основанный на контактном нагреве воды (конечного или промежуточного теплоносителя) в аппаратах погружного горения, является наиболее универсальным и энергоэффективным. Указанные устройства и установки, работающие на их основе, характеризуются КПД, превышающим 100 % по отношению к низшей теплоте сгорания [3].

При этом возможности интенсификации тепломассопереноса в АПГ как средства энергоэффективности их работы далеко не исчерпаны [4].

Поэтому актуальной следует признать разработку газожидкостного теплового реактора, оборудованного АПГ с генерацией колебаний контактирующих фаз наложением электромагнитных полей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Известно значительное количество традиционных и значительно новых способов интенсификации технологических процессов, протекающих в газо-

© В. Е. Никольский, О. Ю. Олейник, В.А. Яриз, И.Л. Решентняк, 2017

ПОЛЬЗО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

жидкосных системах [1]. Известно, что магнитные и электрические поля оказывают влияние на тепло- и массообменные процессы в различных системах [5]. В ряде работ приведены экспериментальные данные, подтверждающие влияние электромагнитных полей на интенсификацию процессов растворения металлов, осветления промышленных растворов и сточных вод [6], перемешивания [7], барботажные [8] и реакционные процессы [9]. Однако причины влияния магнитных и электрических полей на массообменные и химические процессы и эффекты, которые возникают при воздействии, пока изучены недостаточно. Это существенно сдерживает широкое практическое использование указанных методов интенсификации процесса теплопереноса и повышения энергоэффективности газожидкостных процессов. Поэтому исследования, направленные на изучение влияния электромагнитных полей и других способов интенсификации тепломассообмена в газожидкостных процессах, следует признать актуальными. Выбор оптимального способа воздействия на тепломассообменные процессы, протекающие в газожидкостных тепловых устройствах, является ключевой проблемой при решении задачи повышения энергоэффективности оборудования.

Одновременно с этим, несмотря, на актуальность проблемы интенсификации тепломассообмена в тепловых газо-жидкостных аппаратах, в литературе практически не рассмотрен вопрос контроля электрогидравлических эффектов. Указанные эффекты возникают в контактирующих фазах газ-жидкость при воздействии на них электрических и магнитных полей. Максимальный эффект от воздействия налагаемых полей и собственных колебаний среды возникает при достижении эффекта резонанса [10]. Однако на сегодняшний день данные о методах измерения резонансных частот в тепловых реакторах с аппаратами погружного горения отсутствуют. Нет достаточно универсальной методики и оборудования, хотя известно большое количество методов, которые успешно применяются в частных случаях.

В работе [11] приведено описание подвесных микроканальных резонаторов, представлена теоретическая модель подвесных микроканальных резонаторов с учетом электростатического поля и внутренней жидкости. Результаты исследований показывают, что система подвержена нестабильности когда скорость стационарного потока приближается к критической скорости.

Наибольшее распространение получили виброчастотные измерительные преобразователи, в которых резонаторный измерительный датчик механически соединен с исследуемой колеблющейся средой [12]. Главным недостатком таких средств измерения является наличие нелинейности, усложняющей выбор типа резонатора [13]. Предложенная в [14] автоколебательная система виброчастотных датчиков с меняющимся характером нелинейности существенно упрощает разработку резонаторных датчиков.

Таким образом, исследование влияния электрических, магнитных полей и других способов воздействия на процесс массообмена в газожидкостном слое с целью интенсификации является актуальной научной задачей. Выбор метода контроля возникающих электрогидравлических эффектов в зоне контакта фаз является перспективным аспектом решения задачи управления тепломассообменными процессами в тепловых реакторах с аппаратом погружного горения.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является оценка влияния на процесс интенсификации тепломасообмена налагаемых на границу раздела фаз газ-жидкость электрических и магнитных полей в газожидкостных системах, а также выбор наиболее эффективного метода воздействия на границу раздела фаз газ-жидкость и метода контроля возникающих электрогидравлических эффектов для повышения энергоэффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– исследовать влияние электрических и магнитных полей, имеющих градиент напряженности в направлении движения контактирующих фаз, на процесс массообмена между фазами;

– определить кинематические и силовые характеристики в волновом поле, порождаемом взаимодействием фаз при наложении магнитного и электрического полей на границу их раздела;

– разработать способ и устройство наложения оптимального воздействия на границу раздела фаз системы газ-жидкость для усиления колебаний контактирующих фаз с целью интенсификации тепломассообмена в реакторах, оборудованных аппаратами погружного горения;

– разработать метод контроля вынужденных колебаний контактирующих фаз для управления тепловым реактором с аппаратом погружного горения.

4. Исследование влияния магнитных и электрических полей на энергоэффективность тепловых газожидкостных систем

Применение магнитных и электрических полей с заведомо созданными градиентами напряженности с целью усиления эффекта тепломассопереноса технологических процессов основывается на выводах термодинамики необратимых процессов.

Исследования влияния на массообмен магнитных полей проводили на аппарате пленочного типа для получения стабильной поверхности контакта фаз. Это условие позволяет устранить искажения результатов, обусловленных структурой газожидкостного слоя.

Исследования предусматривали следующие варианты работы аппарата: абсорбцию углекислого газа или кислорода водой; десорбцию углекислого газа, кислорода и аммиака азотом; циркуляцию жидкой фазы с целью определения равновесной концентрации. В экспериментальной установке предусмотрены элементы стабилизации и контроля расходов газовой и жидкой фаз.

Пленочный аппарат (рис. 1) был выполнен из немагнитного материала (нержавеющей стали) и снабжен стержнем из магнитомягкой стали конусообразной ступенчатой формы. Такая конструкция обеспечивает неравномерные по напряженности магнитные поля в зазорах шести пар полюсов электромагнитов. Электромагниты расположены вне аппарата на П-образных

НЕ РАЗРЕШАЕТСЯ ТИРАЖИРОВАНИЕ

пакетах из трансформаторной стали. Электрическая схема питания электромагнитов от источника постоянного (пульсирующего) тока позволяла осуществлять различные варианты их включения.

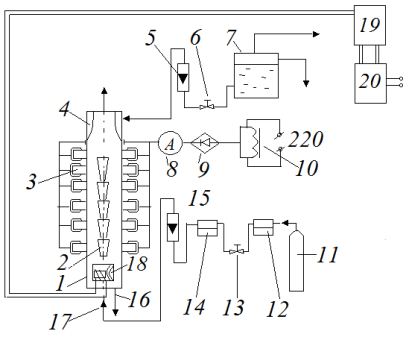

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — труба; 2 — стержень; 3 — электромагнит;
4 — распределитель воды; 5 — ротаметр; 6 — вентиль;
7 — ёмкость; 8 — миллиамперметр; 9 — выпрямитель;
10 — автотрансформатор; 11 — баллон с CO_2;
12 — редуктор; 13 — вентиль; 14 — регулятор расхода;
15 — ротаметр; 16, 17 — трубы; 18 — вибрачастотный
датчик; 19 — осциллограф; 20 — блок питания.

Исследование локальной эффективности контакта фаз проводили путем определения коэффициента массопередачи, значение которого рассчитывали с учетом сравнительного анализа массы жидкости в пробоотборнике при различных напряжениях электрического поля в соответствии с методикой [15]. Пробоотбор осуществлялся в трубе (1) из двух фазового потока только жидкой фазы с применением пробоотборника из пористого материала. Оценку эффективности процесса массопередачи осуществляли на основании полученных экспериментальных кривых (рис. 2).

Для случая абсорбции углекислого газа дистиллированной водой (кривые 4, 5) отмечается характерное смещение экстремальных значений коэффициентов массопередачи в область малых токов (напряженностей магнитных полей). Это позволяет предположить в рассматриваемом случае влияние на процесс массопередачи солевого состава воды. Однако, характер зависимости коэффициентов массопередачи от направления магнитных потоков свидетельствует о том, что солевой состав воды не является единственным определяющим фактором данного процесса.

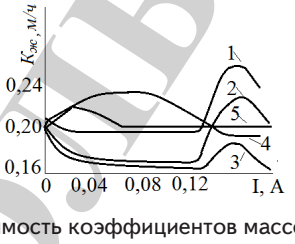

Рис. 2. Зависимость коэффициентов массопередачи $K_ж$ в жидкой фазе от тока I в обмотках электромагнитов:
1 — чередующиеся по направлению магнитные поля;
3 — однонаправленные поля; 2, 4, 5 — неравномерно чередующиеся поля

Для случая абсорбции кислорода (кривые 2, 3) не наблюдается заметного уменьшения коэффициентов массопередачи при малых напряженностях магнитных полей. Однако и в этом случае экстремальные значения отмечены примерно при тех же значениях токов, что и при абсорбции углекислого газа.

Изменение коэффициента массопередачи при наложении магнитных полей, по-видимому, связано с магнитной поляризацией молекул газа и жидкости и интенсификацией их движения. Особенно при чередовании направлений и неоднородной топографии (наличие градиентов) магнитных полей. Кроме того, некоторое влияние оказывают также пульсации контактирующих фаз, вызванные наложением пульсирующих магнитных полей, создаваемых электромагнитами, питающимися пульсирующим с частотой 100 $с^{-1}$ постоянным по направлению током.

Поскольку гидродинамическая обстановка процесса определяет массопередачу между фазами, в работе была предпринята попытка качественно оценить влияние магнитных полей на гидродинамическую обстановку при контактировании одиночных пузырьков газа с жидкостью.

Для исследований была использована установка, состоящая из стеклянной камеры, заполненной технической водой и помещенной между полюсами электромагнита. Изучение полученных кинограмм позволило отметить влияние магнитного поля на форму и скорость подъема пузырьков газа. При включении магнитного поля пузырьки газа, форма которых была близка к сферической, приобретали форму эллипсоидов вращения с отношением оси примерно 0,8, скорость подъема пузырьков снижалась на ~20 %.

Приведенные результаты исследования влияния магнитных полей на массоперенос в системах газ-жидкость свидетельствуют о том, что магнитные поля даже при небольших напряженностях могут быть средством интенсификации массообменных процессов в установках, оборудованных АПГ.

Исследования влияния на массообмен электрических полей выполнялись на колонне пленочного типа диаметром 0,03 м, высотой 1,15 м. Для создания электрического поля стеклянную колонну помещали в обмотку слоя алюминиевой фольги, заземляли по оси колонны, пропускали нихромовую нить, выполняющую роль коронирующего электрода. Схема позволяла подключать нихромовую нить к полюсу источника высокого напряжения.

Оценку эффективности процесса массопередачи при воздействии электрического поля осуществляли по методике, которая применялась при исследовании влияния магнитного поля [15]. Зависимость экспериментально определенного коэффициента массопередачи от напряженности электрического поля при различных расходах жидкости в трубе (1) приведена на рис. 3.

Результаты исследований свидетельствуют, что электрическое поле оказывает значительное влияние на процесс абсорбции углекислого газа (рис. 3). Увеличение интенсивности массопереноса можно объяснить тем, что молекулы воды поляризуются и ориентируются вдоль стенки абсорбера, притягивая ионизированные молекулы CO_2. При этом отрицательные ионы CO_2 имеют более высокую скорость движения [16].

Проведенные исследования в работе [16] свидетельствуют о том, что не менее перспективным может оказаться применение электрических и магнитных

Только для ознакомления

полей для интенсификации синенергетических процессов в диффузионной области. При осуществлении этого способа происходит индуктирование в жидкой фазе электрического тока и, следовательно, электрических полей. Это вызывает микротурбулизацию жидкости в электромагнитных полях и приводит к интенсификации массопереноса. Однако реализация способа возможна лишь в проводящей электрический ток среде. Промышленное осуществление этого способа требует громоздкой технологической оснастки для создания электромагнитных полей (особенно для АПГ больших размеров). Также требуются повышенные энергетические затраты. Это связано с тем, что часть электрической энергии теряется на нагрев обмоток электромагнитов и жидкости, преобразование энергии, преодоление магнитного сопротивления материала аппарата и воздушных зазоров между средой и магнитами.

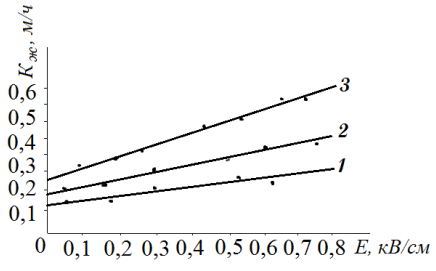

Рис. 3. Зависимость коэффициентов массопередачи $K_ж$ от напряженности электрического поля E при расходе жидкости: 1 — 0,019 м³/ч; 2 — 0,024 м³/ч; 3 — 0,031 м³/ч

Недостатки наложения электрических полей на контактирующие фазы устраняются их предварительной ионизацией [17]. Ионизация контактирующих фаз позволяет существенно интенсифицировать процесс массообмена при малых энергетических и материальных затратах и в тех случаях, когда интенсифицировать процесс с помощью электромагнитных полей невозможно. Кроме того, путем изменения степени ионизации контактирующих фаз: газовой (паровой) и жидкой фазы в АПГ, можно регулировать скорость протекания процесса массообмена (ускоряя или замедляя его). При этом степень ионизации зависит от изменения величины электрического потенциала на электродах ионизатора (расположенных в АПГ у границы раздела фаз).

Для сопоставительного анализа двух последних способов интенсификации были проведены исследования в пленочной абсорбционной колонне из немагнитного материала. В конструкции колонны предусмотрено создание 5 поясов электромагнитных полей с индукцией 0,05 Тл при противотоке контактирующих фаз (воды и углекислого газа). Поля создавали с помощью 15 электромагнитов по 3 в каждом поясе, подключенных к трехфазному переменному току (рис. 1). Полная потребляемая мощность установки составляла 1300 Вт.

При реализации ионизационного способа установка (рис. 1) была оснащена ионизатором, установленном в линии подачи газа в колону (рис. 4).

Газ, вводимый в колонну, предварительно ионизировали в электрическом поле, пульсирующем с частотой 3000 $с^{-1}$. Электрическое поле создавали с помощью электродов, на которые подавали отрицательные переменные по величине электрические потенциалы. Нагрузку по фазам в обеих сериях поддерживали одинаковую. Интенсивность протекания процесса ионизации контактирующих фаз (воды и углекислого газа) оценивали величиной коэффициента массопередачи. Коэффициент массопередачи определяли в соответствии с методикой описанной ранее. При реализации ионизационного способа достигнуто увеличение значений коэффициента массопередачи в 2,7 раза (по сравнению со значениями, полученными при непосредственном воздействии магнитного поля). Потребляемая мощность ионизатора составила 7 Вт. Таким образом, расход электрической энергии при использовании ионизационного способа в 185 раз ниже по сравнению с мощностью, потребляемой установкой с электромагнитами.

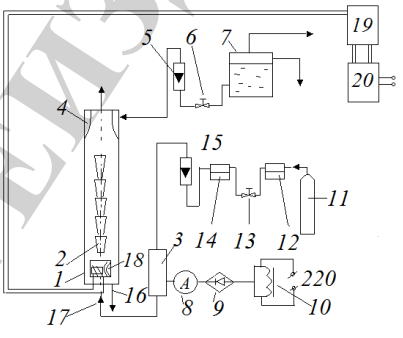

Рис. 4. Схема экспериментальной установки с ионизатором: 1 — труба; 2 — стержень; 3 — ионизатор; 4 — распределитель воды; 5 — ротаметр; 6 — вентиль; 7 — ёмкость; 8 — миллиамперметр; 9 — выпрямитель; 10 — автотрансформатор; 11 — баллон с CO_2; 12 — редуктор; 13 — вентиль; 14 — регулятор расхода; 15 — ротаметр; 16, 17 — трубы; 18 — вибрачастотный датчик; 19 — осциллограф; 20 — блок питания

Известно [18], что многие химические процессы можно интенсифицировать за счет использования энергии ударной волны. Имеются сведения о том, что при воздействии энергии ударной волны протекают процессы крекинга, окисления, синтеза, пиролиза, полимеризации, получения окислов азота непосредственно из воздуха [19].

Одним из наиболее простых приемов получения ударных волн регулируемых параметров является использование электрогидравлического эффекта, возникающего при электрическом разряде в жидкости. Этот эффект широко используется для выбивки стержней из отливок на финишных операциях литейного производства, при создании электрогидроимпульсных прессов и установок. Разработаны также электроимпульсные вибраторы на базе электроразрядной технологии, применяемые, например, для интенсификации диффузионного процесса удаления газовых включений при разливке стали в изложницы. Созданы электрогидравлические смесители для высоковязких жидкостей и даны рекомендации по выбору их основных конструктивных параметров.

В работе [20] рассмотрен массообмен между твердым телом и жидкостью, в которой возбуждается ко-

НЕ ПОДЛЕЖИТ ПЕРЕПЕЧАТИ

лебательный процесс с помощью искровых разрядов различной частоты. Ускорение процесса массообмена в увеличено в 2,3–5 раз. Показано, что коэффициент массообмена является функцией частоты искровых разрядов. Максимальные значения коэффициента массообмена достигнуты при частоте около 200 $с^{-1}$ (для разрядов энергией 0,5–1 Дж, длительностью 25 мкс при температуре воды 18 °С). Эта работа позволила наметить перспективы применения электроискровых и перемешивающих устройств для интенсификации тепло- и массообменных процессов в установках, оборудованных АПГ.

Известны также работы, посвященные интенсификации теплообмена в высокочастотных электрических полях, исследованию внешнего массообмена в системе твердое тело-жидкость при воздействии высоковольтных искровых разрядов [21]. В [22] описана разработка высокоинтенсивного электроконтактора для экстракционного разделения нефтяных дистиллятов избирательными растворителями. Однако сведения о практике использования электрического разряда в жидкости для интенсификации газожидкостных процессов отсутствуют. Между тем, электрогидравлический удар представляет значительный интерес в плане его использования в качестве мощного фактора интенсификации газожидкостных технологических процессов, в т. ч. в установках с АПГ. При электрическом разряде в жидкости (время разряда 10–100 мкс) в канале разряда вещество переходит в плазменное состояние. При этом выделяется огромное количество энергии, температура повышается до нескольких тысяч градусов.

Если назвать эти эффекты электрогидравлического удара первичными, то нельзя не отметить и наличие вторичных эффектов. Вторичные эффекты заключаются в возникновении электрических и магнитных полей с резко меняющейся во времени напряженностью или появлении ударной волны с крутым передним фронтом импульса (ускорение достигает 300 g, давление вблизи канала разряда – 5×10^{10} Па).

Каждый фактор электроимпульсного разряда в жидкости сам по себе уже является мощным средством интенсификации (электрическое и магнитное поле, высокая температура, импульсное изменение давления и др.). Таким образом, при комплексном воздействии всех этих факторов можно ожидать взаимного усиления эффекта интенсификации тепло- и массообменных процессов. Важным моментом является также то, что современное силовое оборудование электрогидравлических установок позволяет варьировать частоту разряда в пределах 0–40 $с^{-1}$. Для многих технологических процессов, протекающих в газожидкостных системах, в т. ч. в АПГ, оптимальная частота виброимпульсных факторов находится в диапазоне 10–20 $с^{-1}$. Отсюда следует признать чрезвычайную заманчивость использования этого эффекта для интенсификации процессов тепло-, массообмена в газожидкостных системах, в том числе АПГ.

Для решения задачи управления тепломассообменными процессами в тепловых реакторах с аппаратом погружного горения необходимо контролировать электрогидравлический эффект, определяющий скорость процесса взаимодействия контактирующих фаз.

5. Контроль процесса колебаний в контактирующих фазах

При контактировании газа и жидкости в экспериментальной установке (рис. 1, 2) возникают колебания среды, частотные характеристики которой определяются множеством факторов: конструкцией камеры установки и распределителя CO_2, скоростями движения фаз и их физико химическими свойствами, давлением, температурой. Таким образом, в экспериментальной установке, служащей для моделирования работы аппарата погружного горения, при контакте фаз образуется сложная колебательная система. И основной задачей при разработке системы управления тепломассообменным процессам в тепловых реакторах с аппаратом погружного горения является выбор метода контроля, который позволит получать информацию, достоверно характеризующую ход процесса.

Для контроля колебаний возникающих вследствие применения электрических, магнитных полей и за счет электроискрового разряда предлагается использовать виброчастотный метод измерения.

Виброчастотные датчики выгодно отличаются возможностью телепередачи измерительной информации на весьма большие расстояния без применения специальных дорогих устройств и каналов связи. Они удобны для прецизионных измерений (0,1–0,5 % от измеряемой величины, или 0,04–0,25 % от верхнего предела измерения) [23].

Предлагается использовать многофункциональный виброчастотный измерительный преобразователь с резонатором цилиндрического типа.

Передаточная функция такого резонатора имеет вид [14]:

$$W_{m.n}(p)=\frac{K_{m,n}}{T_{m,n}^2\cdot p^2+2\cdot\xi_{m,n}\cdot T_{m,n}\cdot p+1}, \quad (1)$$

где $K_{m,n}$, $T_{m,n}$, $\xi_{m,n}$ – соответственно статический коэффициент передачи, постоянная времени и степень успокоения колебаний резонатора на форме на форме колебаний m×n, где m – число полуволн вдоль образующей, n – число волн вдоль окружности.

$$K_{m,n}=\frac{C_{m,n}^q}{d_{m,n}}, \quad (2)$$

$$T_{m,n}^2=\frac{1}{\omega_{m,n}^2}=\frac{\rho\cdot h}{d_{m,n}}, \quad (3)$$

$$\xi_{m,n}=\frac{\delta}{2\cdot\sqrt{\rho\cdot h\cdot d_{m,n}}}=\frac{1}{2\cdot Q_{m,n}}, \quad (4)$$

где $d_{m,n}$ – эффективная жёсткость резонатора; $Q_{m,n}$ – добротность резонатора на соответствующей форме колебаний, ρ, h – плотность материала и толщина стенки резонатора; δ – коэффициент энергетических потерь на данной форме колебаний.

В качестве преобразователя механических колебаний цилиндрического резонатора в электрический сигнал используем индукционный приёмник колебаний (рис. 5).

РЕПОЗИТОРИЙ ГГТУ им. П.О. Сухого

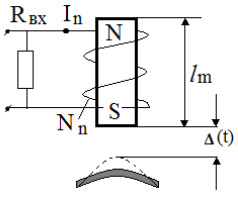

Рис. 5. Устройство приемника колебаний: lm – длина постоянного магнита; Nn – количество катушек приемника; Δ – номинальный зазор между цилиндрическим резонатором и катушкой; Rвх – входное сопротивление усилителя, источника сигнала возбуждения

В динамическом режиме связь между преобразованиями по Лапласу напряжения на выходе индукционного преобразователя $U_n(p)$ и средним перемещением участка поверхности цилиндрического резонатора W_i^{cp} определяется передаточной функцией:

$$W_n(p)=\frac{U_n(p)}{W_i^{cp}}=\frac{K_n\cdot p}{T_n\cdot p+1}. \quad (5)$$

Параметры передаточной функции приемника имеют вид [14]:

$$K_n=\frac{H_0\cdot B_0\cdot S_M\cdot K_\Gamma\cdot R_{вх}\cdot N_n}{(B_0+H_0+K_{воз})\cdot(R_{вх}+R_к)}, \quad (6)$$

$$T_n=\frac{L_K}{(R_{вх}+K_\Gamma+R_к)}, \quad (7)$$

где K_n – статический коэффициент передачи; T_n – постоянная времени; $R_{вх}$ – электрическое входное сопротивление усилителя; N_n – количество катушек приемника, работающих на один вход дифференциального усилителя; H_0, B_0 – напряженность, индукция магнитного поля (параметры рабочей точки на кривой размагничивания магнита); $K_{воз}$ – коэффициент возврата по кривой размагничивания постоянного магнита ($K_{воз}$=0,2...0,3); S_M – площадь поперечного сечения постоянного магнита; N_n – число витков катушки индукционного приемника; $K_г$ – количество катушек приёмника работающих на один вход дифференциального усилителя.

Расположение катушек приемника относительно узлов и пучностей колебаний цилиндрического резонатора учитывается коэффициентом K_{ni}. Если катушки приемника расположены в пучностях возбуждаемых колебаний резонатора, то значения K_{ni}, вычисляются по формуле:

$$K_{ni}=\frac{4}{n\cdot m\cdot\pi\cdot x_0}\cdot\sin\frac{m\cdot\pi\cdot x_0}{2\cdot l}\cdot\sin\frac{n\cdot\theta_0}{2}, \quad (8)$$

где x_0, θ_0 – линейный и угловой размеры катушки.

Для оценки точности выбранного метода измерения использовали цилиндрический резонатор с конструктивными параметрами: длина резонатора L=32 мм, срединный радиус R=20 мм, толщина стенки h=0,1 мм. Измеренные фазовые сдвиги на индуктивностях (15 мГн) составляют для входной цепи Δφ=0,1° для выходной цепи Δφ=0,9°. Резонансная частота датчика, установленного в колонне 1 (рис. 1) составила 5869,25 Гц. Измерения частоты колебаний проводились для трех значений коэффициента передачи обратной связи.

Таблица 1

Результаты определения абсолютной погрешности

Резонансная частота	Абсолютная погрешность, Гц		
	К=1,00	К=0,65	К=0,35
F_p=5869,25 Гц	1,25	0,98	0,84

Полученные значения абсолютной погрешности позволяют использовать виброчастотный метод для контроля частотно-модульных колебаний контактирующих фаз.-

6. Обсуждение результатов исследования влияния магнитных и электрических полей

Влияние электрических и магнитных полей на интенсификацию тепломассообменных процессов в жидкостных системах с аппаратами погружного горения ранее не исследовалось.

Результаты исследования дают возможность использовать электрические и магнитные поля в газожидкостных системах как средства интенсификации процесса тепломассопереноса и повышения энергоэффективности работы аппаратов погружного горения. Это подтверждают приведенные в работе зависимости коэффициентов массопередачи от характеристик электрического и магнитных полей.

Однако сравнительный анализ результатов интенсификации массообменных процессов в газожидкостных системах свидетельствует о том, что оптимальным способом воздействия является способ создания колебаний в зоне контактирующих фаз за счет электроискрового разряда. Разряд возникает при подаче на электроды, расположенные в зоне взаимодействия фаз, постоянных или знакопеременных электрических потенциалов.

Создание между электродами дискретных электрических разрядов приводит к возникновению в контактирующих фазах электрогидравлического эффекта. Возникший эффект обуславливает пульсации фаз, кавитационные, магнитные, электрические, акустические и световые явления. Перечисленные явления, в конечном счете, приводят к увеличению скорости процесса массопередачи. Изменяя форму, расположение электродов, расстояние между ними, а также величину электродов, полярность и частоту подачи электрических потенциалов, можно обеспечить ускорение или замедление процесса контактирования фаз.

Предложенный виброчастотный метод контроля электрогидравлического эффекта процесса тепломассообмена может быть широко использован при автоматизации работы аппаратов погружного горения. Метод контроля позволяет пренебречь измерениями давления, температуры каждой фазы, скоростных характеристик потоков, характеристик магнитного и электрических полей вызывающих колебания контак-

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПРЕДМЕТОМ ПЕРЕДАЧИ

тирующих фаз. Эффекты, возникающие под действием магнитного и электрических полей оцениваются путем измерения частоты колебаний контактирующих фаз газ-жидкость.

7. Выводы

1. Установлено влияние на интенсификацию тепломассообмена налагаемых на границу раздела газ-жидкость электромагнитных полей. Определены коэффициенты массопередачи как функции напряженности электромагнитных полей.

2. Установлено, что при воздействии электрического поля на контактирующие фазы газ-жидкость в установках, оборудованных АПГ, увеличивается интенсивность массопереноса. Показано, что магнитные поля, характеризующиеся небольшими напряженностями, могут использоваться для интенсификации массообменных процессов.

3. Оптимальным способом интенсификации тепломассообмена в реакторах, оборудованных аппаратами погружного горения, является создание колебаний контактирующих фаз на границе их раздела электроискровым разрядом, возникающим при подаче на электроды электрических потенциалов.

4. Предложен метод контроля вынужденных колебаний контактирующих фаз газ-жидкость с использованием разработанного виброчастотного измерительного преобразователя с цилиндрическим резонатором. Преимуществом предложенного вибрационного метода контроля является отсутствие необходимости измерения характеристик магнитного и электрических полей, влияющих на контактирующие фазы. При этом оценивается результирующий эффект воздействия полей на газожидкосной слой.

Литература

1. Кузма-Китча, Ю. А. Методы интенсификации теплообмена [Текст] / Ю. А. Кузма-Китча. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 112 с.
2. Ибрагимов, У. Х. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / У. Х. Ибрагимов, С. М. Шамуратова, Б. А. Рахмонов // Молодой ученый. – 2016. – № 8. – С. 225–229.
3. Товажнянский, Л. Л. Основы энерготехнологии промышленности [Текст] / Л. Л. Товажнянский, О. Б. Анипко, В. А. Маляренко, Ю. А. Абрамов, В. И. Кривцова. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 436 с.
4. Никольский, В. Е. Разработка и исследование отопительной контактно-модульной системы с применением аппаратов погружного горения [Текст] / В. Е. Никольский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 4, № 8 (76). – С. 31–35. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47459
5. Noghrehabadi, A. Effect of magnetic field on the boundary layer flow, heat, and mass transfer of nanofluids over a stretching cylinder [Text] / A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz, E. Izadpanahi, R. Pourrajab // Journal of Heat and Mass Transfer Research. – 2014. – Vol. 1, Issue 1. – P. 9–16.
6. Gusbeth, C. Pulsed electric field treatment for bacteria reduction and its impact on hospital wastewater [Text] / C. Gusbeth, W. Frey, H. Volkmann, T. Schwartz, H. Bluhm // Chemosphere. – 2009. – Vol. 75, Issue 2. – P. 228–233. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.11.066
7. Miao, X. Effect of an Electromagnetic Brake on the Turbulent Melt Flow in a Continuous-Casting Mold [Text] / X. Miao, K. Timmel, D. Lucas, Z. Ren, S. Eckert, G. Gerbeth // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2012. – Vol. 43, Issue 4. – P. 954–972. doi: 10.1007/s11663-012-9672-0
8. Vogt, T. An experimental study of a bubble-driven liquid metal flow under the influence of a rotating magnetic field [Text] / T. Vogt, A. Andruszkiewicz, S. Eckert, K. Eckert, S. Odenbach, G. Gerbeth // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – Vol. 19. – P. 505–508.
9. Kang, Y. Reaction process under the influence of an electromagnetic field [Text] / Y. Kang // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26. – P. 1439–1446.
10. Zhao, L. Simulation of Magnetic Resonance for Wireless Power Transfer [Text] / L. Zhao, Y. Liu // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 5, Issue 05. – P. 1578–1582.
11. Yan, H. Pull-In Effect of Suspended Microchannel Resonator Sensor Subjected to Electrostatic Actuation [Text] / H. Yan, W.-M. Zhang, H.-M. Jiang, K.-M. Hu // Sensors. – 2017. – Vol. 17, Issue 1. – P. 114. doi: 10.3390/s17010114
12. Эткин, Л. Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика [Текст] / Л. Г. Эткин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 408 с.
13. Zhang, W.-M. Dynamics of Nonlinear Coupled Electrostatic Micromechanical Resonators under Two-Frequency Parametric and External Excitations [Text] / W.-M. Zhang, G. Meng, K.-X. Wei // Shock and Vibration. – 2010. – Vol. 17, Issue 6. – P. 759–770. doi: 10.1155/2010/107404
14. Oliynyk, O. Development of autooscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator [Text] / O. Oliynyk, Y. Taranenko, A. Shvachka, O. Chorna // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 2 (85). – P. 56–60. doi: 10.15587/1729-4061.2017.93335
15. Нікольський, В. Є. Розробка та дослідження апаратів зануреного горіння з багаторазовою інверсією фаз [Текст] / В. Є. Нікольський // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 4, № 1 (24). – С. 60–64. doi: 10.15587/2312-8372.2015.47791
16. Агаев, А. А. Исследование абсорбции газов в электрическом поле [Текст] / А. А. Агаев, В. И. Ибрагимов, Т. С. Курбаналиев // Ученые записки Азерб. Института нефти и химии. – 1976. – № 5. – С. 45–50.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

17. Дульнев, Г. Н. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Г. Н. Дульнев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
18. Гоносков, И. А. Ионизация к квантованном электромагнитном поле [Текст] / И. А. Гоносков, Г. А. Вугальтер, В. А. Миронов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2007. – Т. 132, № 6. – С. 1278–1290.
19. Карасевич, Ю. К. Кинетика химической ионизации в ударных волнах [Текст] / Ю. К. Карасевич // Кинетика и катализ. – 2009. – Т. 50, № 2. – С. 163–169.
20. Кунова, О. В. Влияние неравновесной кинетики на теплоперенос и диффузию за фронтом ударной [Текст] / О. В. Кунова, М. А. Мехоношина // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2014. – Т. 15, № 1.
21. Систер, Р. Г. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов [Текст] / Р. Г. Систер, Ю. В. Мартынов. – Калуга: Изд-во Бочкаревой Н, 1998. – 507 с.
22. Молчанов, А. Д. Метод искровых разрядов для ускорения массообмена в системе твердое тело-жидкость [Текст] / А. Д. Молчанов, А. Г. Аксельруд, А. И. Чернявский и др. // ИФЖ. – 1970. – Т. 18, № 2. – С. 293–299.
23. Присняков, В. Тепломассообмен и вибрация [Текст]: монография / В. Присняков, С. Бондаренко, В. Луценко и др. – Одесса: Нептун-Технология, 2001. – 208 с.

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПЕРЕИЗДАНИЕМ