УДК 66.021:502.1
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.371-387

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАЛИБРОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАДСОРБЦИОННЫХ АППАРАТОВ СЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Н. А. Меренцов[1], А. В. Персидский[2], М. В. Топилин[3], А. Б. Голованчиков[1]

Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», steeple@mail.ru; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (1); АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады» (2); ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть» (3), г. Волгоград, Россия

Ключевые слова: адсорбция; газовые выбросы; массообмен; селективная очистка газов; сорбент; сорбция; фильтрационные течения; электроадсорбция.

Аннотация: Представлена схема автоматической калибровки технологических параметров электроадсорбционных массообменных аппаратов селективной очистки газовых выбросов на примере электроадсорбера непрерывного действия с подвижным слоем адсорбента. Программа калибровки базируется на автоматическом распознавании диапазонов регулирования режимов работы электроадсорбционных аппаратов на стадии пусконаладочных работ или в ходе текущей эксплуатации технологического массообменного оборудования. Калибровке подлежат гидродинамика фильтрационного течения через слой адсорбента и параметры электрического поля, при этом распознаются оптимальные фильтрационные режимы с точки зрения омывания гранул адсорбентов потоком сплошной газовой фазы, а определение пределов регулирования параметров электрического поля базируется на автоматической проверке качества изоляции электрической части массообменного аппарата, а также распознавании тока, возникающего в цепи при появлении движения ионов между заряженными поверхностями (ионного ветра). Программа калибровки и полученные с ее помощью параметры позволят самоадаптивной системе автоматизированного управления электроадсорбционными процессами добиваться наивысших показателей степеней очистки газовых выбросов при оптимальных энергетических затратах на осуществление массообменных процессов и предоставят возможность сгладить технологические, масштабные и другие факторы, свойственные конкретным массообменных процессам и конструкциям аппаратов.

Введение

Интенсификация процессов в химической промышленности связана с решением многоплановых комплексных научно-технических проблем и базируется как на традиционных, так и принципиально новых методах, опирающихся на последние достижения физики, химии и смежных областей науки. Использование раз-

личных физических эффектов и химических воздействий позволяет в значительной степени интенсифицировать химико-технологические процессы и в большинстве случаев получать результаты, недостижимые при традиционной технологии [1, 2].

Массообменные сорбционные аппараты различного назначения получили очень широкое применение в экологических процессах селективной очистки жидкостных и газовых выбросов, а также технологических процессах многих отраслей промышленности: химической, нефтехимической, нефтегазовой, металлургической, строительной, машиностроительной, пищевой, фармакологической, биохимической и др. [3 – 7]. Наиболее значительна роль массообменных процессов в экологии, так как защита окружающей среды от загрязнений является серьезной проблемой [8 – 20]. Использование процессов адсорбции и ионообмена в сочетании с физическими эффектами позволяет успешно выходить из сложнейших ситуаций. Санитарная очистка газов, обеззараживание и нейтрализация сточных и радиоактивных вод представляют собой серьезный комплекс технических и технологических процессов. Главной задачей, связанной с качественной работоспособностью и обеспечением должных показателей работы, таких как концентрации извлекаемых компонентов, степени очистки жидкостей и газов, является обеспечение устойчивого непрерывного режима работы и равномерного времени пребывания продуктов массообмена (сорбентов и сплошных фаз) в массообменных аппаратах. Одним из самых перспективных направлений совершенствования массообменных сорбционных процессов и аппаратов авторы считают наложение электрических полей заданной напряженности, что существенно интенсифицирует массообменные процессы, повышает степень улавливания извлекаемых из газа или жидкости (сплошной фазы) компонентов, повышает емкость сорбентов и увеличивает их время защитного действия [1]. Речь идет о таких массообменных процессах как электроадсорбция, ионный обмен в электрическом поле, электродесорбция, электроабсорбция, каждый из которых обладает своими технологическими особенностями и конструктивным аппаратурным оформлением [1, 2].

Цель работы – разработка систем автоматизированного распознавания и поддержания оптимальных режимов работы электроадсорбционных массообменных аппаратов, позволяющих обеспечить наивысшие доступные показатели степеней очистки извлекаемых из газовых потоков компонентов, в условиях наиболее полного использования емкости адсорбентов, продлевая время их защитного действия, в режимах энергосбережения и сохранности гранул адсорбентов от истирания и закупоривания микропор.

Следует отметить, что разработанная и представленная в данной работе схема автоматизированного управления режимами работы и калибровки технологических параметров массообменных электроадсорбционных аппаратов может быть адаптирована под любой тип электроадсорбционного процесса и аппарата любого конструктивного исполнения, как непрерывного, полупериодического, так и периодического действия, с подвижными, неподвижными и псевдоожиженными слоями сорбентов и т.д.

На примере разработанной конструкции электроадсорбера непрерывного действия рассмотрим прикладной пример и раскроем физический смысл автоматизированных систем калибровки технологических параметров и управления (рис. 1). В данной конструкции электроадсорбера реализована схема «плоского конденсатора», подразумевающая равномерность напряженности электрического поля между витками (обкладками), возникающего между противоположно заряженными сетчатыми винтовыми поверхностями *1* и *2* двухзаходного шнекового винта. Прототип данной конструкции подробно представлен в работе [21].

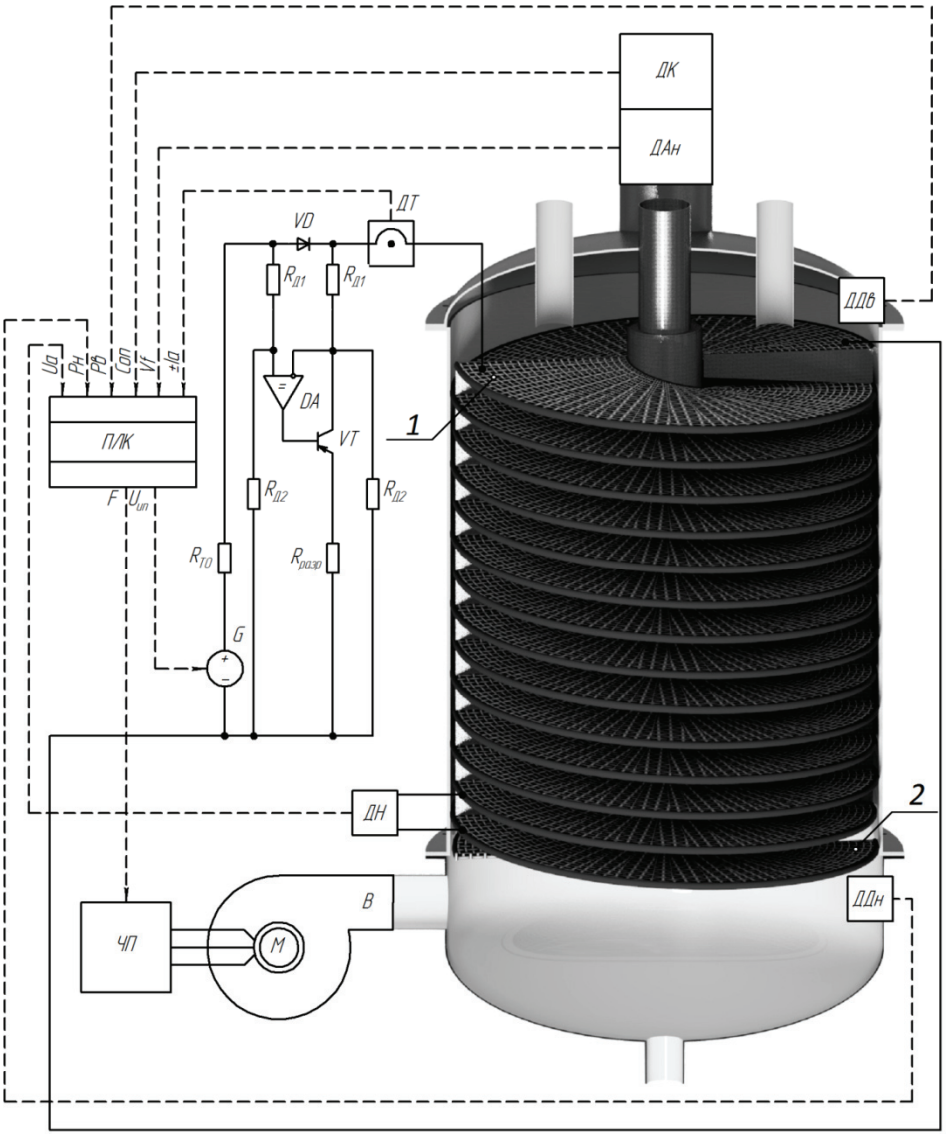


Рис. 1. Схема управления электроадсорбционным аппаратом непрерывного действия

Схема управления электроадсорбционным аппаратом непрерывного действия состоит из установленных на выходном газовом патрубке датчиков концентрации извлекаемого компонента *ДК* и анемометрического датчика *ДАн*, измеряющего скорость (расход) газового потока (см. рис. 1). В верхнем и нижнем патрубках адсорбера (также между витками) имеются датчики давления газа, соответственно *ДДв* и *ДДн*. Для нагнетания очищаемой сплошной газовой фазы в аппарат служит воздуходувка *В* с приводом от асинхронного электродвигателя *М*, запитанного через частотный преобразователь *ЧП*. Для создания внутри аппарата электрического поля два захода винтовых решеток электроадсорбера подключены к разным полюсам высоковольтного управляемого источника постоянного напряжения *G*. Для защиты источника напряжения от перегрузки по току служит токоограничивающий резистор R_{TO}. Для устранения эффекта сохранения напряжения между поверхностями аппарата, вследствие наличия у него электрической

емкости, служит цепь разряда, состоящая из компаратора на основе операционного усилителя *DA* и двух одинаковых делителей напряжения на резисторах *РД1* и *РД2*. При превышении напряжения между решетками аппарата над напряжением источника питания, вследствие уменьшения его выходного напряжения, выходным сигналом компаратора открывается транзистор *VT*, в результате чего через разрядное сопротивление *Rразр* начинает течь ток, пока напряжения источника питания и аппарата не сравняются. В цепи питания аппарата имеется датчик тока *ДТ* на эффекте Холла. Датчики данного типа могут измерять величину постоянного тока и восприимчивы к его направлению. К противоположным концам спиральных решеток аппарата присоединены вводы датчика напряжения *ДН*, который определяет фактическое напряжение между поверхностями аппарата. Сигналы датчиков передаются в программируемый логический контроллер *ПЛК*, где происходит выполнение управляющих программ. Сигналы управления от контроллера передаются на частотный преобразователь *ЧП*, который изменяет частоту вращения воздуходувки *B*, а также на источник питания *G*, изменяющий напряжение питания массообменного аппарата.

Перейдем к принципам автоматизированного регулирования процессом электроадсорбции и поиску оптимальных режимов работы, с учетом гидродинамики и параметров наложенного электрического поля на процесс электроадсорбции. Принцип автокалибровки и автоматизированного управления заключается в самоадаптации массообменной системы под эталонные (оптимальные) показатели работы, за счет наложения регулируемого электрического поля заданной напряженности на процессы электросорбции и распознавания наиболее эффективных гидромеханических режимов омывания поверхностей гранул сорбентов сплошной фазой при помощи индекса турбулизации, который служит инструментом оценки вклада инерционной составляющей структуры фильтрационного течения сплошной фазы через слой сорбента. Разработанные программы позволяют добиваться наивысших доступных показателей улавливания вредных компонентов из сплошной газовой фазы в условиях режимов энергосбережения массообменных сорбционных аппаратов.

Индекс турбулизации – индекс, получаемый в ходе аппроксимации экспериментально полученных однофазных (двухфазных) фильтрационных кривых течений через слои сорбентов, который является прямым отражением вклада инерционной составляющей в общую структуру фильтрационного течения. Наиболее пристальное внимание авторы начали уделять вкладу инерционной составляющей, так как в сорбционных массообменных аппаратах наивысшие показатели интенсивности массоотдачи наблюдаются в условиях интенсивного омывания гранул сорбентов потоком сплошной фазы. При этом предложены два различных метода определения индекса турбулизации, каждый из которых корректен и способен найти свое лабораторное и промышленное применение для определенного спектра массообменных процессов и аппаратов. Первым способом является определение инерционной составляющей структуры фильтрационного течения за вычетом вязкостной составляющей, что необходимо учитывать в условиях фильтрационных течений через слои относительно низкопроницаемых пористых сред для таких процессов, как ионный обмен, адсорбция, фильтрационная сушка и др. При этом используется модифицированное уравнение, обеспечивающее плавный переход от линейного вязкостного участка фильтрационной кривой к переходному нелинейному без разрыва полей скоростей и давлений:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha\mu\upsilon_{ф} + \left(\frac{\upsilon_{ф} - \upsilon_{кр}}{B}\right)^{m},$$

где $\Delta P/H$ – удельное гидравлическое сопротивление слоя сорбента; α – коэффициент, отражающий влияние структуры пористого слоя на сопротивление, оказы-

ваемое фильтрационному течению силами вязкого трения; μ – динамическая вязкость сплошной фазы; $\upsilon_ф$ – скорость фильтрации сплошной фазы через слой сорбента; $\upsilon_{кр}$ – критическая скорость фильтрации, ограничивающая линейный участок фильтрационной кривой; *B* – коэффициент, определяемый структурой пористой среды; *m* – показатель степени, называющийся индексом турбулизации (для слоев сорбентов и ионитов). Таким образом, получаем инструмент для оценки вклада инерционной составляющей структуры фильтрационного течения за вычетом вязкостной составляющей, что позволяет осуществлять объективную оценку фильтрационным течениям, развивающимся по изначально несопоставимым гидродинамическим сценариям, и отследить формирование динамики турбулентного течения сплошной фазы через слои гранул сорбентов и ионитов. Второй способ определения индекса турбулизации применим при фильтрационных течениях через слои относительно высокопроницаемых пористых сред в условиях изначально несущественного вклада вязкостной составляющей структуры фильтрационного течения (абсорбция, испарительное охлаждение, мокрая очистка газов и др.) [22].

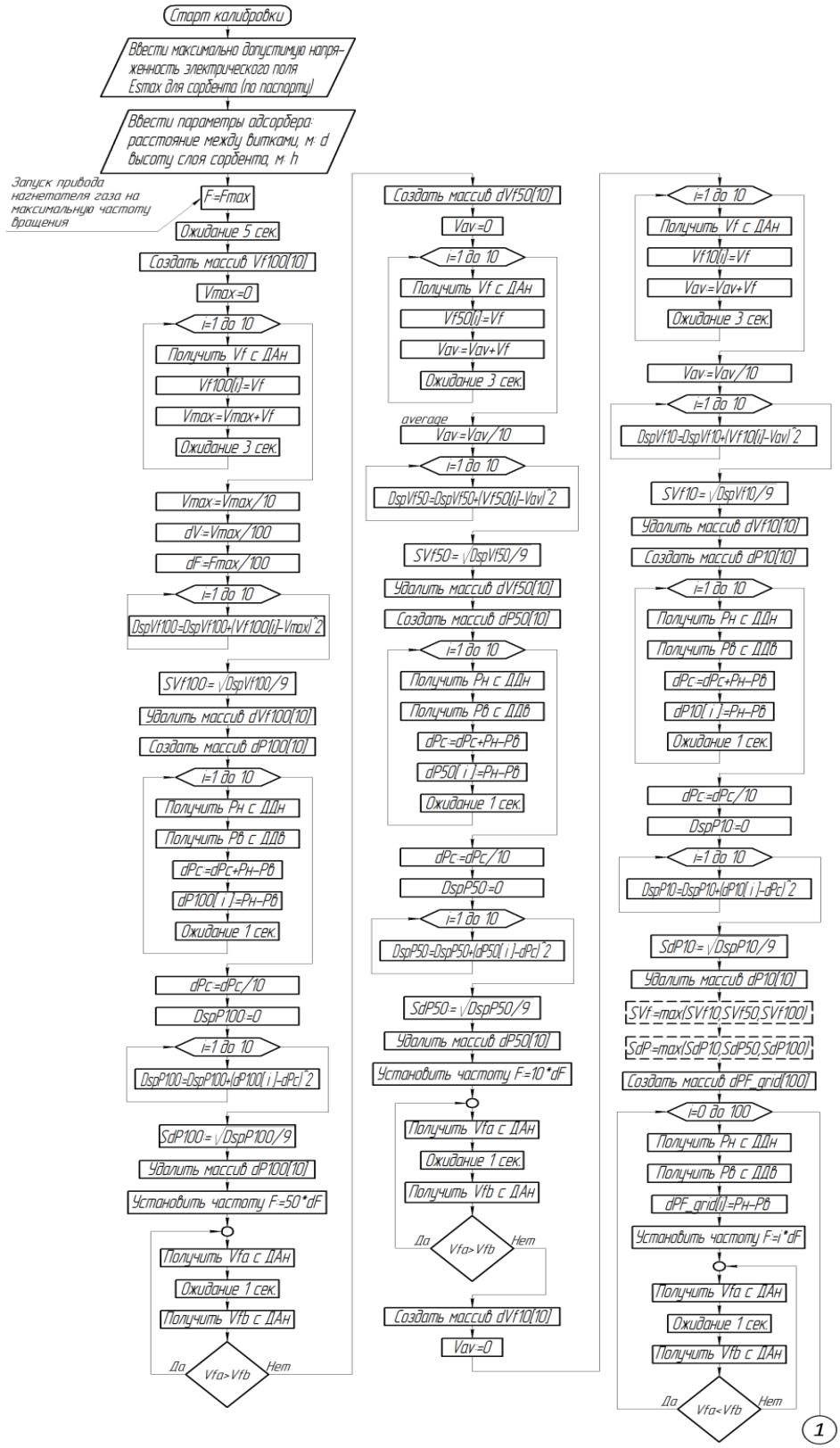
В алгоритм автокалибровки и автоматизированного регулирования закладываются следующие операции. Система управления массообменным аппаратом во время работы в автоматическом режиме непрерывно анализирует зависимость $\Delta P/H = f(\upsilon_f)$ («фильтрационные кривые»), то есть удельные гидравлические сопротивления восходящему потоку газа при плавно возрастающем расходе сплошной фазы. При этом на стадии калибровки аппарат снимает фильтрационную кривую газораспределительных решеток (сетчатых винтовых поверхностей) для последующего стадийного вычитания полученных данных из суммарных фильтрационных кривых через слои сорбентов.

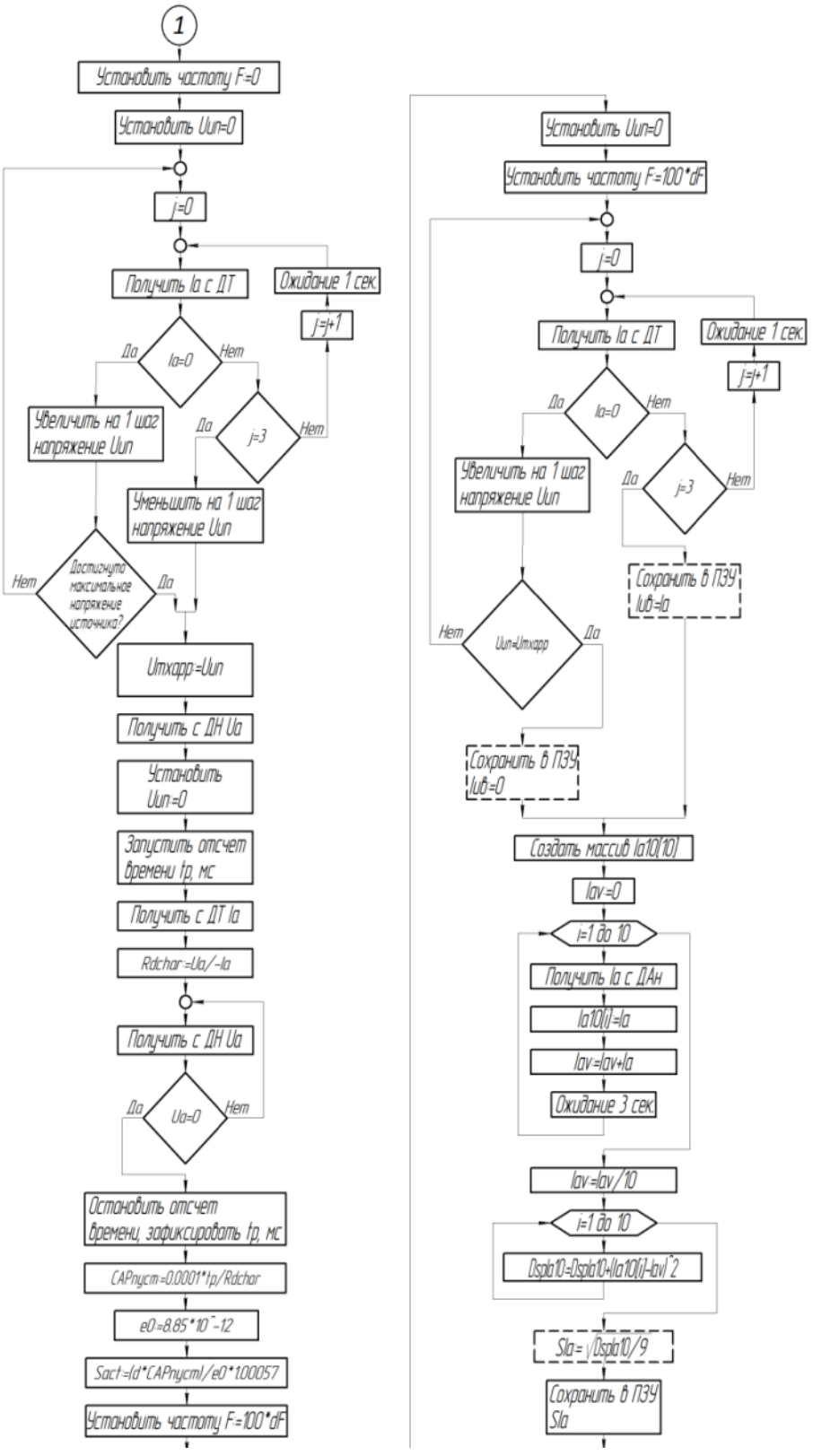
Из анализа зависимостей $\Delta P/H = f(\upsilon_f)$ потока сплошной газовой фазы через слои сорбентов программа получает сведения по гидродинамическим всплескам, то есть нарастающим инерционным составляющим структуры фильтрационного потока сквозь слой адсорбента, за вычетом вязкостных составляющих. Индекс турбулизации отражает динамику развития турбулентного течения сплошной фазы через слои гранул сорбентов, интенсивность омывания поверхностей адсорбентов и их внешнедиффузионных слоев, что приводит к резкой интенсификации массообменных процессов и повышению степени очистки газовых выбросов в сорбционных массообменных аппаратах.

Для определения всех необходимых технологических параметров работы электросорбционного массообменного аппарата перед первым запуском выполняется программа калибровки. Это автоматизированный процесс, алгоритм которого представлен на рис. 2.

Операция калибровки начинается с ручного ввода значений, которые нельзя определить автоматически: максимально допустимой напряженности электрического поля для сорбента *Es*max, которая является паспортной величиной для адсорбента и геометрических параметров массообменного аппарата; расстояния между витками *d*; высоты слоя сорбента *h*, определяемого как расстояние от винтовой поверхности до кромки радиальной перегородки; сопротивления разрядного резистора *Rdchar*.

На первом этапе программа определяет гидродинамические параметры, необходимые для последующего автоматизированного управления рабочим режимом аппарата, такие как среднеквадратическое отклонение показаний анемометрического датчика *ДАн* и величину шагов изменения скорости выходящего газового потока и частоты вращения воздуходувки *B*. Программа определяет максимальную скорость сплошной газовой фазы *V*max. Далее получает элементарные ступени регулирования скорости фильтрации *dV* и частоты вращения воздуходувки *dF*.


Старт калибровки
Ввести максимально допустимую напряженность электрического поля Esmax для сорбента (по паспорту)
Ввести параметры адсорбера: расстояние между витками, м: d высоту слоя сорбента, м: h
Запуск привода нагнетателя газа на максимальную частоту вращения
F:=Fmax
Ожидание 5 сек.
Создать массив Vf100[10]
Vmax:=0
i:=1 до 10
Получить Vf с ДАн
Vf100[i]:=Vf
Vmax:=Vmax+Vf
Ожидание 3 сек.
Vmax:=Vmax/10
dV:=Vmax/100
dF:=Fmax/100
i:=1 до 10
DspVf100:=DspVf100+(Vf100[i]-Vmax)^2
SVf100:=√DspVf100/9
Удалить массив dVf100[10]
Создать массив dP100[10]
i:=1 до 10
Получить Pн с ДДн
Получить Pв с ДДв
dPc:=dPc+Pн-Pв
dP100[i]:=Pн-Pв
Ожидание 1 сек.
dPc:=dPc/10
DspP100:=0
i:=1 до 10
DspP100:=DspP100+(dP100[i]-dPc)^2
SdP100:=√DspP100/9
Удалить массив dP100[10]
Установить частоту F:=50*dF
Получить Vfa с ДАн
Ожидание 1 сек.
Получить Vfb с ДАн
Vfa>Vfb
Да
Нет
Создать массив dVf50[10]
Vav:=0
i:=1 до 10
Получить Vf с ДАн
Vf50[i]:=Vf
Vav:=Vav+Vf
Ожидание 3 сек.
average
Vav:=Vav/10
i:=1 до 10
DspVf50:=DspVf50+(Vf50[i]-Vav)^2
SVf50:=√DspVf50/9
Удалить массив dVf50[10]
Создать массив dP50[10]
i:=1 до 10
Получить Pн с ДДн
Получить Pв с ДДв
dPc:=dPc+Pн-Pв
dP50[i]:=Pн-Pв
Ожидание 1 сек.
dPc:=dPc/10
DspP50:=0
i:=1 до 10
DspP50:=DspP50+(dP50[i]-dPc)^2
SdP50:=√DspP50/9
Удалить массив dP50[10]
Установить частоту F:=10*dF
Получить Vfa с ДАн
Ожидание 1 сек.
Получить Vfb с ДАн
Vfa>Vfb
Да
Нет
Создать массив dVf10[10]
Vav:=0
i:=1 до 10
Получить Vf с ДАн
Vf10[i]:=Vf
Vav:=Vav+Vf
Ожидание 3 сек.
Vav:=Vav/10
i:=1 до 10
DspVf10:=DspVf10+(Vf10[i]-Vav)^2
SVf10:=√DspVf10/9
Удалить массив dVf10[10]
Создать массив dP10[10]
i:=1 до 10
Получить Pн с ДДн
Получить Pв с ДДв
dPc:=dPc+Pн-Pв
dP10[i]:=Pн-Pв
Ожидание 1 сек.
dPc:=dPc/10
DspP10:=0
i:=1 до 10
DspP10:=DspP10+(dP10[i]-dPc)^2
SdP10:=√DspP10/9
Удалить массив dP10[10]
SVf:=max(SVf10,SVf50,SVf100)
SdP:=max(SdP10,SdP50,SdP100)
Создать массив dPF_grid[100]
i:=0 до 100
Получить Pн с ДДн
Получить Pв с ДДв
dPF_grid[i]:=Pн-Pв
Установить частоту F:=i*dF
Получить Vfa с ДАн
Ожидание 1 сек.
Получить Vfb с ДАн
Vfa<Vfb
Да
Нет
1


1
Установить частоту F=0
Установить Uип=0
j=0
Получить Ia с ДТ
Ожидание 1 сек.
j=j+1
Ia=0
Да
Нет
Увеличить на 1 шаг напряжение Uип
j=3
Да
Нет
Уменьшить на 1 шаг напряжение Uип
Достигнуто максимальное напряжение источника?
Нет
Да
Umxapp=Uип
Получить с ДН Ua
Установить Uип=0
Запустить отсчет времени tp, мс
Получить с ДТ Ia
Rdchar=Ua/-Ia
Получить с ДН Ua
Ua=0
Да
Нет
Остановить отсчет времени, зафиксировать tp, мс
CAPnycm=0.0001*tp/Rdchar
e0=8.85*10^-12
Sact=Id*CAPnycm/e0*1.00057
Установить частоту F=100*dF
Установить Uип=0
Установить частоту F=100*dF
j=0
Получить Ia с ДТ
Ожидание 1 сек.
j=j+1
Ia=0
Да
Нет
Увеличить на 1 шаг напряжение Uип
j=3
Да
Нет
Сохранить в ПЗУ Iub=Ia
Uип=Umxapp
Нет
Да
Сохранить в ПЗУ Iub=0
Создать массив Ia10[10]
Iav=0
i=1 до 10
Получить Ia с ДАн
Ia10[i]=Ia
Iav=Iav+Ia
Ожидание 3 сек.
Iav=Iav/10
i=1 до 10
Dspla10=Dspla10+(Ia10[i]-Iav)^2
Sia=√Dspla10/9
Сохранить в ПЗУ Sia

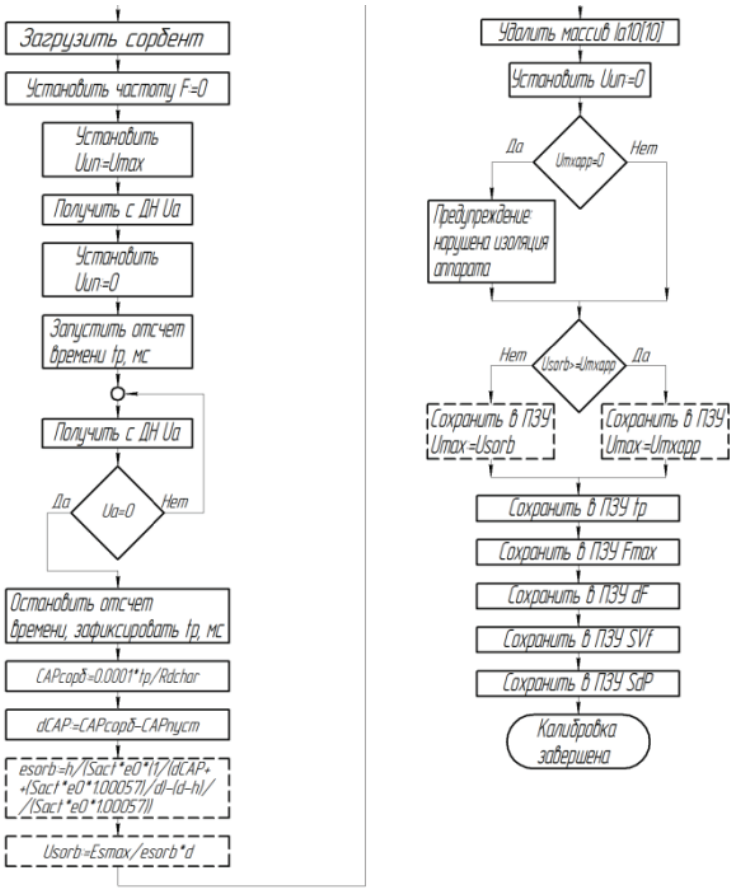


Рис. 2. Алгоритм автоматизированной калибровки технологических параметров электроадсорбционных аппаратов селективной очистки газовых выбросов

После чего вычисляет среднеквадратическое отклонение *SVf* скорости фильтрации и среднеквадратическое отклонение разности давлений в нижнем и верхнем патрубках массообменного аппарата, а также между витками и секциями аппарата *SdP*.

На следующем этапе программа переходит к снятию фильтрационной кривой газораспределительных решеток массообменного аппарата. В программе она представляет собой значения разности давлений, определенные при изменении скорости газового потока с шагом 1 %. При каждой итерации цикла программа ожидает установления постоянной скорости потока с помощью цикла ожидания (развернутая версия алгоритма программы калибровки представлена на рис. 2).

После анализа и адаптации гидродинамических составляющих программа переходит к калибровке параметров электрического поля. При выборе диапазонов регулирования параметров электрического поля (напряженности) учитываются паспортные расчетные характеристики [1]. Однако осуществлять автокалибровку параметров электрического поля и последующее гибкое автоматическое управление режимами электроадсорбционных аппаратов предполагается за счет методики распознавания «ионного ветра». «Ионный ветер» возникает вследствие движения ионизированных молекул газа под действием электрического поля высокой напряженности и, вследствие соударений, вовлечения в движение и неионизированных молекул. Это приводит к резкой активизации поглощения из газов извлекаемых компонентов твердыми сорбентами [1], что позволяет существенно снизить напряженность электрического поля по сравнению с номинальной, без потери

качества улавливания из газов извлекаемых компонентов и степени насыщаемости адсорбентов. Рассмотрим принцип и алгоритм калибровки параметров электрического поля с учетом автоматизированного регулирования напряженности электрического поля и распознавания «ионного ветра». Поскольку «ионный ветер» представляет собой движение ионов газа между заряженными поверхностями, о его возникновении можно судить по нарастанию тока в цепи источника напряжения, сообщающего заряд винтовым поверхностям электроадсорбционного массообменного аппарата. Для этого в цепи электропитания аппарата имеется датчик тока на эффекте Холла.

На первом этапе программа проверяет, может ли изоляция аппарата выдержать максимальное напряжение источника питания, а если нет, то определяет максимальное напряжение и одновременно проверяет качество изоляции массообменного сорбционного аппарата. Сначала программа останавливает воздуходувку и делает контрольную установку напряжения источника питания в ноль. Затем по командам программы источник питания пошагово увеличивает напряжение, пока в цепи питания аппарата не появится ток. После его появления программа дает команду источнику питания уменьшить напряжение на 1 шаг и фиксирует уставку напряжения источника в специальной переменной *Umxapp* (максимальное напряжение массообменного аппарата). Таким образом, в переменной *Umxapp* оказывается максимальное значение уставки напряжения источника питания, при котором ток в цепи аппарата еще не появляется, либо максимальное напряжение, которое может выдать источник питания.

После чего программа переходит к определению электрическим путем активной площади перекрытия решеток. Поскольку решетки массообменного аппарата непрерывного действия [21] можно рассматривать как плоский конденсатор, аппарат обладает определенной электрической емкостью, которая пропорциональна площади взаимной проекции решеток друг на друга. Для этого программа получает с датчика напряжения *ДН* значение мгновенного напряжения между решетками аппарата, а затем дает команду источнику питания отключить напряжение, что вызывает срабатывание цепи разряда, и электрическая емкость аппарата начинает разряжаться через датчик тока *ДТ* и разрядное сопротивление *Rdchar*. Программа получает с датчика напряжения *ДН* текущие значения, затем выдает команду отключить напряжение источника и запускает отсчет времени по системному таймеру контроллера в миллисекундах. После этого программа получает с датчика тока *ДТ* мгновенное значение тока в цепи, далее рассчитывает величину полного сопротивления цепи разряда *Rdchar*. Поскольку ток течет от аппарата, по датчику его значение будет отрицательным, поэтому в расчетную формулу введен знак минус.

Затем программа входит в цикл, в котором проверяет, достигло ли напряжение между решетками аппарата нуля. Цикл выполняется непрерывно, пока аппарат не разрядится. После чего программа останавливает отсчет времени и сохраняет получившееся время в переменной tp. На следующем шаге программа рассчитывает электрическую емкость аппарата. Расчетная формула емкости аппарата получена из формулы

$$U_{\text{кон}} = U_{\text{нач}} \mathrm{e}^{\frac{-0{,}001tp}{RC}}, \tag{1}$$

где $U_{\text{кон}}$, $U_{\text{нач}}$ – соответственно остаточное и исходное напряжения на конденсаторе, *В*; *tp* – время разряда, мс; *R* – сопротивление цепи разряда, Ом; *C* – электрическая емкость плоского конденсатора, Ф.

Если принять $U_{\text{кон}} = 0{,}0001U_{\text{нач}}$, после преобразования получим

$$C = \frac{0{,}0001tp}{R} \tag{2}$$

или в обозначениях, принятых в алгоритме:

$$CAP_{\text{пуст}} = \frac{0{,}0001tp}{Rdchar}. \quad (3)$$

Далее программа присваивает переменной значение электрической постоянной и переходит к расчету активной площади винтовых решеток аппарата. Расчетная формула активной площади получена из выражения

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (4)$$

где ε = 1,00057 – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; S – площадь взаимной проекции пластин конденсатора, м^2; d – расстояние между витками аппарата (пластинами конденсатора), м.

Выражая из формулы (4) площадь взаимной проекции пластин конденсатора, получим

$$S = \frac{dC}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (5)$$

После определения активной площади массообменного аппарата программа инициирует загрузку сорбента в аппарат при максимальном рабочем расходе сплошной газовой фазы. Затем программа выдает команду на выключение воздуходувки и на включение источника питания на ранее определенное напряжение Umax, после чего представленным способом, используя формулу (2), определяет электрическую емкость аппарата, заполненного сорбентом.

Далее программа переходит к определению на основе полученных результатов измерений относительной диэлектрической проницаемости сорбента. Поскольку относительная диэлектрическая проницаемость среды указывает, во сколько раз напряженность электрического поля в среде меньше, чем в вакууме, для определения напряжения на решетках, соответствующего максимально допустимой напряженности электрического поля в сорбенте, ее нахождение необходимо. В основе метода определения относительной диэлектрической проницаемости сорбента положен принцип разности электрической емкости аппарата с загруженным сорбентом и пустого. Программа определяет разность $dCAP$ или (ΔC), а затем рассчитывает относительную диэлектрическую проницаемость сорбента. Расчетная формула получена из формулы расчета плоского конденсатора с несколькими слоями различных диэлектриков между обкладками. Расчетная схема представлена на рис. 3.

Такой конденсатор можно рассматривать как два последовательно соединенных конденсатора с различными диэлектриками. Тогда выражение для разности емкостей ΔC пустого аппарата $C_{\text{пуст}}$ и аппарата, загруженного сорбентом $C_{\text{сорб}}$, Ф, будет иметь вид

$$\Delta C = C_{\text{пуст}} - C_{\text{сорб}} = \left(\frac{d-h}{\varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_0 S} - \frac{h}{\varepsilon_{\text{с}}\varepsilon_0 S} \right)^{-1} - \frac{\varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_0 S}{d}, \quad (6)$$

где h – высота слоя сорбента, ограничиваемая радиальными перегородками, м; $\varepsilon_{\text{в}}$, $\varepsilon_{\text{с}}$ – относительные диэлектрические проницаемости воздуха и сорбента соответственно, $\varepsilon_{\text{в}}$ = 1,00057; S – активная площадь решеток аппарата, м^2.

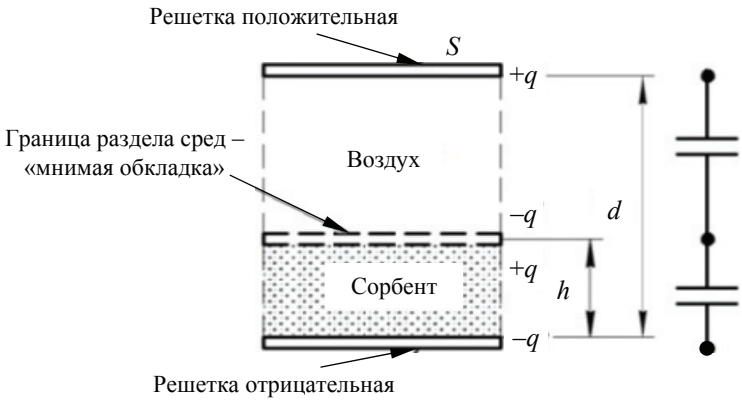


Рис. 3. Расчетная схема с несколькими слоями различных диэлектриков между обкладками

Преобразуя выражение относительно ε_c, получим

$$\varepsilon_c = \frac{h}{S\varepsilon_0\left(\dfrac{1}{\Delta C + \dfrac{S\varepsilon_0\varepsilon_в}{d}} - \dfrac{d-h}{S\varepsilon_0\varepsilon_в}\right)}. \quad (7)$$

Приведенная расчетная формула включена в программу. Далее программа рассчитывает, при каком напряжении между решетками электроадсорбера в слое сорбента создается электрическое поле с напряженностью *Es*max, то есть, максимально допустимой напряженностью электрического поля для адсорбента.

Следующим этапом программа переходит к определению тока «ионного ветра», то есть минимально определяемого тока, возникающего в результате движения ионов воздуха (газа) от одной винтовой решетки адсорбера к другой под действием электрического поля. Поскольку принудительное движение воздуха (газа) в массообменном аппарате способно ускорить перенос ионов, программа, выдав контрольную команду отключить питание массообменного аппарата, дает команду включить воздуходувку на максимальную частоту вращения, соответствующую максимальному рабочему расходу газового потока. Затем проводит действия, аналогичные тем, которые осуществлялись для определения максимального напряжения, которое способен выдержать массообменный аппарат. Программа увеличивает напряжение, подаваемое на аппарат, до тех пор, пока с датчика тока *ДТ* не появится сигнал, отличный от нуля. После чего проводит три считывания данных с датчика тока с интервалом в одну секунду. Если после третьего считывания ток не исчез, программа сохраняет в ПЗУ его значение как значение тока «ионного ветра» *I*ив. Если напряжение источника питания дошло до максимального, а ток так и не появился, программа присваивает переменной *I*ив значение 0 и сохраняет его в ПЗУ.

Далее программа переходит к определению среднеквадратического отклонения определения тока в цепи массообменного аппарата. Принцип определения среднеквадратического отклонения показаний датчика тока такой же, как и других датчиков. Программа, оставляя напряжение и скорость газового потока, соответствующие наличию тока в цепи аппарата, создает массив из 10 элементов, после чего входит в цикл, где с периодичностью в три секунды получает показания датчика тока и сохраняет их в массиве, а также суммирует данные показания в переменной *Iav*.

После 10 итераций программа делит число из переменной *Iav* на число циклов и получает среднее значение тока в цепи. Затем программа входит в цикл, где определяет дисперсию показаний датчика тока, а на следующем шаге рассчитывает среднеквадратическое отклонение и сохраняет в ПЗУ как переменную *SIa*.

Далее программа удаляет массив и отключает подачу напряжения на массообменный аппарат. Затем проверяет, равняется ли определенное максимальное напряжение, которое выдерживает аппарат, нулю, и, если равняется, выдает предупреждение о нарушении изоляции аппарата. После чего программа проверяет, является ли напряжение, соответствующее максимально допустимой для сорбента напряженности электрического поля, большим либо равным максимальному напряжению, которое способна выдерживать изоляция аппарата. Если является, в качестве верхнего предела напряжения в ПЗУ сохраняется максимальное напряжение для массообменного аппарата, в противном случае – максимальное напряжение для сорбента.

Затем программа сохраняет в ПЗУ найденные в ходе калибровки технологические параметры электроадсорбционного аппарата. На этом процесс калибровки завершается.

Заключение

Разработана система автоматической калибровки технологических параметров и самоадаптивного гибкого регулирования режимов работы электроадсорбционных массообменных аппаратов очистки газовых выбросов, которая базируется на распознавании оптимальных гидродинамических условий протекания массообменных сорбционных процессов, сопутствующих активному омыванию поверхностей адсорбентов сплошным газовым потоком, а также оптимизации параметров напряженности электрического поля с учетом «ионного ветра», что приводит к существенной интенсификации массообменных процессов, повышает степень улавливания извлекаемых из газа компонентов (особенно в условиях сверхмалых концентраций извлекаемых вредных веществ), снижает внутридиффузионное сопротивление адсорбентов, увеличивает емкость сорбентов, продлевает время защитного действия адсорбентов в условиях энергосбережения при осуществлении работы электроадсорбционных установок.

Программы калибровки технологических параметров и управления электросорбционными процессами позволят добиться наивысших показателей работы и степеней очистки газовых выбросов для широкого спектра конструкций массообменных аппаратов с учетом сложнейших особенностей конкретного массообменного технологического процесса и особенно актуальны в условиях улавливания сверхмалых концентраций извлекаемых из газов вредных компонентов (веществ), что часто встречается в экологических процессах и является насущной проблемой.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук МК-1287.2020.8 «Моделирование процессов управления в массообменном экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании».

Список литературы

1. Голованчиков, А. Б. Интенсификация массообменных процессов в электрическом поле : монография / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина. – Волгоград : ВолгГТУ, 2011. – 152 с.

2. Голованчиков, А. Б. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока : монография / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – 128 с.

3. Nikolaeva, L. Purification of Gas Emissions of Chemical Industry Enterprises by Carbonaceous Cutting / L. Nikolaeva, A. Khusnutdinov // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22, No. 8. – P. 14 – 18.

4. Голованчиков, А. Б. Уравнение фильтрации для насадочных контактных устройств / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 8 – 10.

5. Research Dispersing Liquid and Gas in the Contact Device with an Increased Range of Stable Operation / A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. N. Nikolaev // Ecology and Industry of Russia. – 2017. – Vol. 21, No. 3. – P. 12 – 15.

6. Авторежимные насадочные колонны для пульсационной жидкостной экстракции / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, А. Б. Голованчиков // Экологические системы и приборы. – 2020. – № 3. – С. 3 – 14. doi: 10.25791/esip.03.2020.1140

7. Меренцов, Н. А. Моделирование тепломассообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения : монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 140 с.

8. Сергунин, А. С. Исследование динамики адсорбции и десорбции паров воды активным оксидом алюминия и цеолитом Nax / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 664 – 671.

9. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода / В. Г. Матвейкин, А. А. Ишин, С. А. Скворцов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 548 – 556. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556

10. Адсорбция в колонне непрерывного действия с диффузионной структурой потока по газовой фазе / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2016. – № 2. – С. 23 – 31.

11. Dmitriev, A. V. Cleaning of Industrial Gases from Aerosol Particles in Apparatus with Jet-Film Interaction of Phases / A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22, No. 6. – P. 10 – 14.

12. Golovanchikov, A. B. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, M. V. Topilin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – P. 012023.

13. Рухов, А. В. Математическое моделирование процессов адсорбции ионов кобальта Co^{2+} активированными углями, модифицированными углеродными нанотрубками / А. В. Рухов, И. В. Романцова, Е. Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 360 – 367.

14. Golovanchikov, A. B. Ion Exchange in Continuous Apparatus with Diffused Flow Structure in Liquid / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 983. – P. 645 – 652.

15. Моделирование ионообмена в аппарате непрерывного действия с диффузионной структурой потока по жидкости / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 10. – С. 15 – 23.

16. Modelling and Calculation of Industrial Absorber Equipped with Adjustable Sectioned Mass Exchange Packing / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, V. N. Lebedev [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 983. – P. 560 – 573.

17. Автоматическое управление режимами работы насадочных аппаратов селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев, А. Б. Голованчиков // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 10 – 16.

18. Golovanchikov, A. B. Modelling of Absorption Process in a Column with Diffused Flow Structure in Liquid Phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 983. – P. 635 – 644.

19. Перспективы использования промышленных отходов машиностроительных предприятий для решения экологических проблем строительной отрасли / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестн. ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 182 – 195.

20. Ломовцева, Е. Е. О пористой структуре гибридных сорбирующих материалов для осушки воздуха / Е. Е. Ломовцева, М. А. Ульянова, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 299 – 305.

21. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes / N. A. Merentsov, A. B. Golovanchikov, M. V. Topilin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 055028.

22. Оценка интенсивности развития турбулизации в тепломассообменных насадочных контактных устройствах для селективной очистки газовых выбросов и испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов [и др.] // Вестн. ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 79, № 2. – С. 245 – 254.

The Automated Calibration System for Process Parameters of Electric Adsorption Devices for Selective Purification of Gas Emissions

N. A. Merentsov[1], A. V. Persidskiy[2], M. V. Topilin[3], A. B. Golovanchikov[1]

Department of Processes and Equipment for Chemical and Food Industries, steeple@mail.ru; Volgograd State Technical University (1); JSC "Federal Research and Production Center "Titan-Barricades"(2); LLC LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft (3), Volgograd, Russia

Keywords: adsorption; gas emissions; mass transfer; selective gas cleaning; sorbent; sorption; filtration currents; electric adsorption.

Abstract: The procedure for automatic calibration of process parameters of electric adsorption mass transfer devices for selective purification of gas emissions is presented on the example of a continuous electric adsorber with a moving adsorbent bed. The calibration program is based on automatic recognition of the ranges of regulation of the operating modes of electric sorption devices at the stage of commissioning or during the current operation of technological mass transfer equipment. The hydrodynamics of the filtration flow through the adsorbent bed and the parameters of the electric field are subject to calibration, while the optimal filtration regimes from the point of view of washing the adsorbent granules with a continuous gas phase flow are recognized. Determination of the control limits for the parameters of the electric field is based on an automatic check of the quality of electrical insulation part of the mass transfer device, as well as recognition of the current arising in the circuit when ions move between charged surfaces (ionic wind). The calibration program and the

parameters obtained with its help will enable the self-adaptive system of automated control of electrical adsorption processes to achieve the highest rates of purification of gas emissions, with optimal energy costs for the implementation of mass transfer processes and will provide an opportunity to smooth out technological, large-scale and other factors inherent in specific mass transfer processes and device designs.

References

1. Golovanchikov A.B., Yefremov M.Yu., Dul'kina N.A. *Intensifikatsiya massoobmennykh protsessov v elek-tricheskom pole: monografiya* [Intensification of mass transfer processes in an electric field: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2011, 152 p. (In Russ.)
2. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A. *Modelirovaniye sorbtsionnykh protsessov s uchetom struktury potoka: monografiya* [Modeling of sorption processes taking into account the flow structure: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2018, 128 p. (In Russ.)
3. Nikolaeva L., Khusnutdinov A. Purification of Gas Emissions of Chemical Industry Enterprises by Carbonaceous Cutting, *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 14-18.
4. Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Merentsov N.A. [Filtration equation for packed contact devices], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2017, no. 1, pp. 8-10. (In Russ.)
5. Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Nikolaev A.N. Research Dispersing Liquid and Gas in the Contact Device with an Increased Range of Stable Operation, *Ecology and Industry of Russia*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 12-15.
6. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. [Auto-mode packed columns for pulsating liquid extraction], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2020, no. 3, pp. 3-14, doi: 10.25791/esip.03.2020.1140 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Modelirovaniye teplomassoobmennykh nasadochnykh ustroystv s razvitym kapel'nym rezhimom techeniya: monografiya* [Modeling of heat and mass transfer packed devices with a developed drip flow regime: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2019, 140 p. (In Russ.)
8. Sergunin A.S., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. [Study of the dynamics of adsorption and desorption of water vapor by active aluminum oxide and zeolite NAX], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 664-671. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Matveykin V.G., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretskiy S.I. [Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and hydrogen production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 548-556, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Adsorption in a continuous column with a diffusion structure of the flow in the gas phase], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2016, no. 2, pp. 23-31. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S. Cleaning of Industrial Gases from Aerosol Particles in Apparatus with Jet-Film Interaction of Phases, *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 10-14.
12. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Topilin M.V. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, p. 012023.
13. Rukhov A.V., Romantsova I.V., Tugolukov Ye.N. [Mathematical modeling of the adsorption of cobalt ions by CO^{2+} activated carbons modified with carbon

nanotubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 360-367. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2019, vol. 983, pp. 645-652.

15. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Modeling of ion exchange in a continuous apparatus with a diffusion structure of the flow through liquid], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2015, no. 10, pp. 15-23. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2019, vol. 983, pp. 560-573.

17. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Golovanchikov A.B. [Automatic control of the modes of operation of the nozzles selective cleaning of gas emissions], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 10-16. (In Russ.)

18. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2019, vol. 983, pp. 635-644.

19. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Karasev A.G., Golovanchikov A.B. [Prospects for the use of industrial waste from machine-building enterprises for solving environmental problems of the construction industry], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2019, no. 4 (77), pp. 182-195. (In Russ., abstract in Eng.)

20. Lomovtseva Ye.Ye., Ul'yanova M.A., Gatapova N.Ts. [On the porous structure of hybrid sorbent materials for air drying], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 299-305. (In Russ., abstract in Eng.)

21. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Tezikov D.A. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 055028.

22. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Lebedev V.N., Persidskiy A.V. [Assessment of the intensity of turbulization development in heat and mass transfer packed contact devices for selective purification of gas emissions and evaporative cooling of industrial circulating water], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2020, vol. 79, no. 2, pp. 245-254. (In Russ., abstract in Eng.)

Automatisiertes Kalibriersystem für technologische Parameter der elektrischen Adsorptionsgeräte für selektive Reinigung von Gasemissionen

Zusammenfassung: Das Schema der automatischen Kalibrierung technologischer Parameter der elektrischen Adsorptionsmassentransfervorrichtungen zur selektiven Reinigung von Gasemissionen ist am Beispiel eines kontinuierlichen elektrischen Adsorbers mit einer beweglichen Adsorbensschicht vorgestellt. Das Kalibrierungsprogramm basiert auf der automatischen Erkennung der Regelungsbereiche der Betriebsarten von Elektrosorptionsgeräten in der Phase der Inbetriebnahme oder während des aktuellen Betriebs von technologischen Stoffübergangsgeräten. Die Hydrodynamik des Filtrationsflusses durch die Adsorbensschicht und die Parameter des elektrischen Feldes unterliegen einer Kalibrierung, dabei werden optimale Filtrationsmodi hinsichtlich des Waschens

des Adsorbensgranulats mit einem kontinuierlichen Gasphasenfluss festgestellt; und die Bestimmung der Kontrollgrenzen für die Parameter des elektrischen Feldes basiert auf der automatischen Überprüfung der Qualität der Isolierung des elektrischen Teils des Stoffübergangsgerätes sowie auch auf der Erkennung des im elektrischen Netz entstehenden Stroms, wenn sich Ionen zwischen geladenen Oberflächen bewegen (Ionenwind). Das Kalibrierungsprogramm und die mit seiner Hilfe erhaltenen Parameter ermöglichen dem selbstadaptiven System der automatisierten Steuerung von Elektrodesorptionsprozessen, die höchsten Werte für die Reinigung von Gasemissionen bei optimalen Energiekosten für die Implementierung von Stoffaustauschprozessen zu erzielen, und bieten die Möglichkeit, technologische, großangelegte und andere Faktoren zu glätten, die bestimmten Stoffaustauschprozessen und Gerätekonstruktionen eigen sind.

Système du calibrage automatisé des paramètres des appareils d'électroadsorption du traitement sélectif des émissions de gaz

Résumé: Est présenté le schéma du calibrage automatique des paramètres technologiques des appareils d'échange de masse d'électroadsorption pour la purification sélective des émissions de gaz à l'exemple d'un électroadsorbeur à action continue avec une couche mobile d'adsorbant. Le programme du calibrage est basé sur la reconnaissance automatique des plages de réglage des modes du fonctionnement des appareils d'électroadsorption au stade de la mise en service ou dans le fonctionnement actuel de l'équipement d'échange de masse technologique. Au calibrage est soumis l'hydrodynamique de l'écoulement de filtration à travers une couche d'adsorbant et les paramètres du champ électrique; sont reconnus les régimes optimaux de filtration. Le programme du calibrage et les paramètres obtenus permettent au système autoadaptés automatisés de gestion des processus d'adsorption d'atteindre des taux les plus élevés des degrés du raffinage des gaz et donne la possibilité de niveler les facteurs technologiques, à grande échelle et d'autres, propres au processus du transfert de masse et de la conception des appareils.

Авторы: ***Меренцов Николай Анатольевич*** – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; ***Персидский Александр Владимирович*** – ведущий инженер-конструктор АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»; ***Топилин Михаил Владимирович*** – инженер 2-й категории лаборатории стандартных исследований керна ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть»; ***Голованчиков Александр Борисович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.