

УДК 681.53

А.В. ЧУМАЧЕНКО

НПП ХАРТРОН-АРКОС, Украина

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСХОДА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ ЙОДОВ, ЗОЛЕЙ И ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ

Рассматриваются особенности построения математической модели расхода газовой среды для автоматизированной системы мониторинга объёмной активности газовых сред. Осуществлён анализ существующего математического аппарата, моделирующего процесс перемещения газов в трубопроводах различной конфигурации и исполнения. Сформирована упрощённая математическая модель расхода газовой среды при различных положениях регулирующего органа. Полученные, в ходе апробации, результаты в виде зависимости расхода от процента открытия регулирующей арматуры в привязке ко времени моделирования оценены исходя из реальных значений, полученных на исследовательском стенде. Сделано заключение о возможности применения данной математической модели.

Ключевые слова: математическая модель расхода газовой среды, вентиляционные системы, автоматизированная система радиационного контроля, ПИД - регулятор, регулирование, расход газовых сред.

Постановка задачи

Текущее состояние мировой атомной энергетики определяет необходимость всеобъемлющего контроля радиационной обстановки (РО) на территории АЭС, что напрямую связано с опытом возникновения нештатных ситуаций на АЭС (АЭС Фукусима-1) и громадными последствиями радиационных аварий. Своевременный и адекватный мониторинг РО при штатной эксплуатации и в ходе развития аварийной ситуации должен, как минимум, обеспечить оперативный персонал АЭС точной информацией о состоянии объекта и, как следствие, привести к быстрой локализации возникшей проблемы. Все эти факторы формируют высокие требования к современным автоматизированным системам радиационного контроля (АСРК) с точки зрения точности и своевременности измерения и контроля различных радиационных параметров.

В данной статье рассматривается разработанная предприятием НПП Хартрон-Аркос автоматизированная система контроля и мониторинга объёмной активности (АСКМ ОА) выбросов йодов, золь и инертных радиоактивных газов с точки зрения, обеспечения высокой скорости и достоверности обнаружения радиоактивных веществ.

Спроектированная АСКМ ОА, представленная на рис. 1, характеризуется тем, что обеспечивает автоматический процесс отбора пробы из различных помещений энергоблока АЭС с последующим измерением объёмной активности газовой среды.

При этом существует задача, важная для процесса измерения, — обеспечение достоверности замеров путём поддержания заданного значения расхода газовой среды в линии отбора пробы.



Рис. 1. Внешний вид АСКМ ОА НПП Хартрон-Аркос

Это связано с технологическими особенностями функционирования датчиков радиационного контроля объёмной активности выбросов йодов, золь и инертных радиоактивных газов, для которых должен постоянно поддерживаться заданный уро-

вень расхода газовой среды.

Выполнение этой задачи в современных системах АСКМ, которые представлены на рынке Украины (разработки Mirion Technologies, НПП «Доза», ООО «Вестрон»), проработано недостаточно в полной мере и обеспечивается только в установившемся режиме работы. Влияние переходных процессов, связанных с переключением запорной арматуры для отбора пробы из разных помещений или деградацией технологического оборудования, не учитывается в схеме автоматизации [1]. Следовательно, процесс регулирования (поддержания заданного уровня) расхода не реализуется в некоторых режимах работы этих АСКМ, что, в свою очередь, ухудшает скорость реакции оперативного персонала при фиксации выбросов радиоактивных веществ.

Для устранения этой тенденции в АСКМ ОА применяется индивидуальный процесс регулирования, обеспечивающий минимизацию времени переходных процессов регулирования расхода газа, т.е. максимально быстрого получения достоверных измерений объёмной активности. Это подтверждается результатами испытаний ПИД-регулятора, созданного в рамках АСКМ ОА, которые приведены в публикации [1]. В ходе данных исследований были получены оптимальные настройки ПИД-регулятора путём построения экспериментальных областей устойчивости исходя из одинаковых начальных условий (каждый эксперимент начинался из полностью закрытого положения регулирующей арматуры) [1,2].

Для уточнения настроек ПИД-регулятора (т.е. улучшения характеристик), с учётом различных начальных условий, количество прогонов на реальном АСКМ ОА необходимо увеличить многократно, что выливается в неоправданно большие временные затраты. Поэтому от экспериментов с реальным АСКМ ОА необходимо перейти к моделированию процесса регулирования с учётом математической модели расхода газа, проходящего по трубопроводной системе АСКМ ОА. Построение данной математической модели позволит не только решить задачу нахождения оптимальных настроек ПИД-регулятора, с точки зрения минимизации времени переходных процессов прямыми методами поиска, но и применить другие, например, вероятностные методы поиска [3,4].

Анализ существующего математического аппарата

Рассматриваемая АСКМ ОА газовых сред интегрирована в системы вентиляции и газоочистки ЭБ АЭС и, по сути, является системой отбора пробы замкнутого цикла. В связи с этим, приемлемо фор-

мировать математическую модель расхода газовой среды для АСКМ ОА, используя математический аппарат, разработанный для расчётов характеристик вентиляционных систем.

В публикации [5], авторы которой берут за основу классический математический аппарат, предлагается описывать неустановившееся движение воздуха по воздуховодам следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \frac{\lambda \rho}{8R_r} \partial v^2(x,t) + \rho \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}, \\ -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время от начала переходного процесса;

p — давление в трубопроводе;

x — длина рассматриваемого участка трубопровода;

λ — коэффициент гидродинамического трения;

R_r — гидравлический радиус трубопровода;

ρ — плотность газовой среды;

v — скорость перемещения газовой среды;

c — скорость звука в газовой среде.

Система уравнений (1) может быть преобразована в линеаризованный вид с введением параметра, определяющего расход газовой среды [5]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \frac{2a\rho}{S} Q(x,t) + \frac{\rho}{S} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t}, \\ -\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = \frac{S}{\rho c^2} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (2)$$

где $2a$ — линеаризованный коэффициент аэродинамического сопротивления;

Q — расход газовой среды;

S — площадь поперечного сечения трубопровода.

В системе уравнений (2) первое уравнение учитывает аэродинамическое сопротивление движения газовой среды и её инерционные свойства. Второе уравнение учитывает сжимаемость газовой среды, а в нашем случае для АСКМ ОА — рассматриваемый участок трубопровода, на котором находятся регулирующая арматура и расходомер, не превышает одного метра, и данным уравнением можно пренебречь в связи с тем, что в публикации [5] обоснована несжимаемость газовой среды для коротких трубопроводов.

Оставшееся первое уравнение преобразовывается для получения зависимости расхода газовой среды в коротком трубопроводе от времени переходного процесса [5] следующим образом:

$$Q(t) = \frac{P_0}{2a\rho L/S} (1 - e^{-2at}), \quad (3)$$

где p_0 — давление в начальном сечении трубопровода;

L — длина трубопровода.

Полученная функциональная зависимость (3) является искомой математической моделью расхода газовой среды для АСКМ ОА. При моделировании также необходимо учитывать зависимость расхода газовой среды от степени открытия регулирующей арматуры. Исходя из выше сказанного, запишем формулу (3) в следующем виде:

$$Q(t, k) = \frac{P_0}{2a(k)\rho L/S(k)} (1 - e^{-2a(k)t}), \quad (4)$$

где k — процент открытия регулирующей арматуры.

Рассмотрим подробно составляющие функциональной зависимости (4).

Адаптация математической модели

Параметр давления в начальном сечении трубопровода формулы (4) определяется не только характеристиками насосного блока [6] установки АСКМ ОА, но и за счёт потери давления из-за сопротивлений трубопроводной части АСКМ ОА, расположенной перед расходомером по потоку. Схема соединения трубопроводов и технологического оборудования АСКМ ОА представлена на рис. 2. Габаритные размеры стойки АСКМ ОА, в которой расположена данная трубопроводная сеть, — 1,2 м на 0,8 м. Как видно из рисунка, до рассматриваемого нами участка трубопровода, начинающегося с расходомера и заканчивающегося регулирующей арматурой, расположен участок с несколькими запорными арматурами, датчиками радиационного контроля и различными по своей конфигурации трубопроводами. Для определения потери давления на данном начальном участке применим следующую формулу [7]:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{\rho v_i^2}{2}, \quad (5)$$

где i — элемент начального участка трубопроводной сети;

ζ_i — коэффициент сопротивления i -ого элемента;

ρ — плотность газовой среды,

v_i — скорость газовой среды в i -ом элементе трубопроводной сети.

Расчёты, проведенные по формуле (5) с использованием данных из [7], показали незначительную потерю давления. Данный вывод подтверждается следующим результатом эксперимента, где, при полностью открытой арматуре и включенном блоке

насосов, измеренный расход соответствует максимальному заявленному производителем насосов [6] и составляет 112 л/мин, что эквивалентно заявленному максимальному давлению в 1,3 бар. Таким образом, на входе в расходомер потери давления в пересчёте из расхода не зафиксированы измерительным прибором.

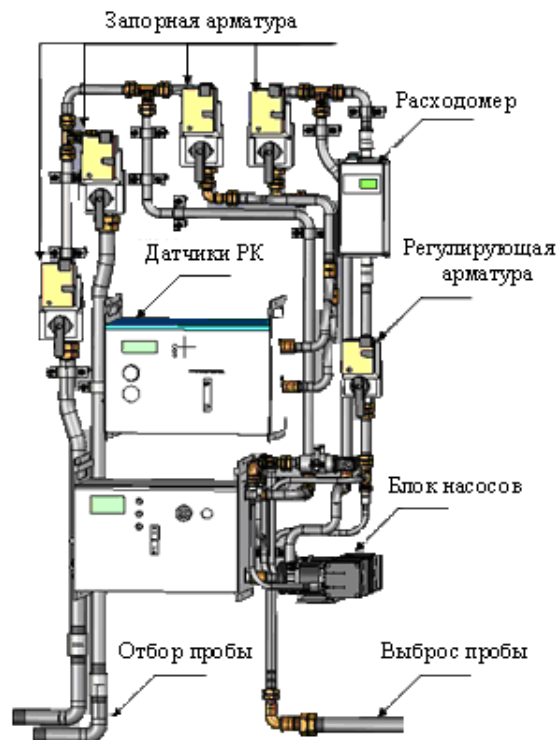


Рис. 2. Общая схема трубопроводов и технологического оборудования АСКМ ОА

В формуле (4) также присутствует ряд параметров, являющихся функциями от процента открытия регулирующей арматуры, таких как:

1) линеаризованный коэффициент аэродинамического сопротивления, вычисляемый по следующей формуле:

$$2a = \left(\frac{\lambda v}{8R_\Gamma} \right)_{cp}, \quad (6)$$

где λ — коэффициент трения газовой среды, равный 0,0375 и вычисленный по формуле для ламинарного течения газовой среды, т.к. число Рейнольдса (Re) в нашем случае 2000 [7];

R_Γ — гидравлический радиус трубопровода, вычисляемый исходя из диаметра круглого трубопровода, который является функцией от процента открытия регулирующей арматуры. Здесь и далее принято допущение, что процент открытия регулирующей арматуры учитывается в виде линейной зависимости при вычислении геометрических характеристик трубопровода;

v — средняя по сечению и по времени скорость

движения газовой среды в рассматриваемом участке трубопровода во время переходного процесса. В ходе экспериментов установлено значение, равное 1,1 м/с;

2) площадь поперечного сечения трубопровода, в вычисление которого также входит геометрический размер (радиус или диаметр) однодюймового трубопровода, который изменяется в зависимости от процента открытия регулирующей арматуры.

Дополнительно в формулу (4) входит параметр плотности газовой среды (ρ), равный 1,225 кг/м³, и параметр длины трубопровода, округлённого до 1 м.

Используя перечисленные выше данные, были получены следующие результаты моделирования.

Результаты моделирования

Оценка адекватности предлагаемой математической модели расхода газовой среды в коротком трубопроводе выполнялась путём сравнения с реальными данными по расходу газовой среды, измеренными в ходе экспериментов на АСКМ ОА при различных значениях процента открытия регулирующей арматуры. Полученный в ходе эксперимента график зависимости расхода от процента открытия регулирующей арматуры приведен на рис. 3.

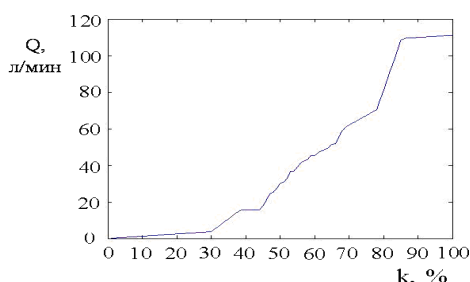


Рис. 3. Экспериментальная зависимость расхода газовой среды (Q) от процента открытия регулирующей арматуры АСКМ ОА (k)

Для анализа эффективности рассматривался график максимальных абсолютных погрешностей вычисления расхода на всём диапазоне открытия регулирующей арматуры от времени переходного процесса, приведённый на рис. 4. Моделирование проходило путём изменения времени переходного процесса в диапазоне от 0 до 30 секунд с шагом в одну десятую секунды, и на каждом шаге по формуле (4) рассчитывалась зависимость расхода газовой среды от процента открытия регулирующей арматуры. Эффективность работы модели определялась с помощью вычисления абсолютной погрешности между экспериментальными данными (рис. 3) и полученными зависимостями расхода от процента открытия при работе модели.

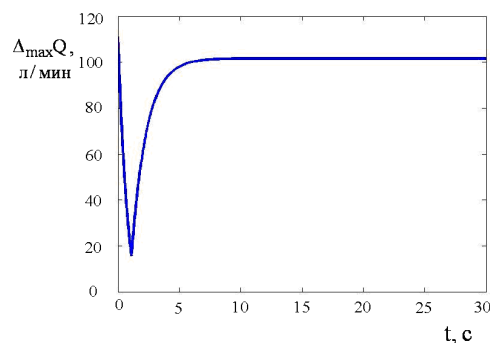


Рис. 4. Зависимость максимальных абсолютных погрешностей вычисления расхода на всём диапазоне открытия регулирующей арматуры ($\Delta_{\max} Q$) от времени переходного процесса (t)

Из рис. 4 видно, что на всём временном отрезке моделирования максимальные погрешности имеют недопустимо большой уровень. Более детальный анализ графиков абсолютных погрешностей и зависимостей расхода от процента открытия регулирующей арматуры показал, что максимальные погрешности, в основном, достигаются в диапазоне от 80 до 100 процентов открытия арматуры. В подтверждение данного вывода приведём зависимость расхода от процента открытия для 30 секунды моделирования в сравнении с экспериментальной кривой (рис. 5).

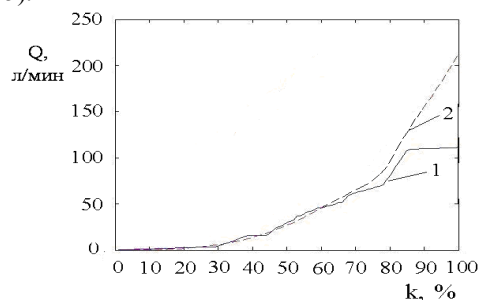


Рис. 5. Зависимость расхода газовой среды (Q) от процента открытия регулирующей арматуры (k):
1 – экспериментальная зависимость;
2 – результирующая зависимость работы модели на 30 секунде переходного процесса

Если исключить данный диапазон из рассмотрения в ходе моделирования, то зависимость, приведённая на рис. 4, примет следующий вид – рис. 6. В части исключаемого диапазона будем считать расход на основе экспериментальных данных равным максимальной производительности насосного блока – 112 л/мин.

Как видно из рис. 6, практически на всём временном диапазоне моделирования, за исключением интервала от 0 до 0,74 секунды, максимальная абсолютная погрешность не превышает 6,42 л/мин. В свою очередь максимальная относительная погрешность составляет 14,18 %. Средняя абсолютная по-

грешность на этом же интервале не превышает 1,17 л/мин, а средняя относительная погрешность составляет 10,59 %. Т.к. заявленные погрешности измерений расходомера АРГ-МИКРО (используемого в составе АСКМ ОА), приведенные на сайте производителя [8], имеют аналогичный уровень, то можно констатировать приемлемость результатов моделирования в данном временном диапазоне, основываясь на значениях полученных погрешностей. Лучший результат по уровню максимальной абсолютной погрешности (5,07 л/мин) наблюдается на 1,8 секунде моделирования переходного процесса, для которой на рис. 7 приведен график абсолютной погрешности (в ходе анализа рассматривался только диапазон открытия регулирующей арматуры от 0 до 80 %).

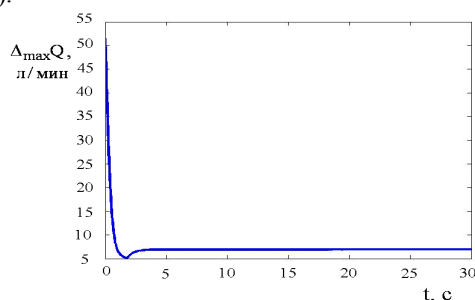


Рис. 6. Зависимость максимальных абсолютных погрешностей вычисления расхода ($\Delta_{\max} Q$) в диапазоне открытия регулирующей арматуры 0 – 80 % от времени переходного процесса (t)

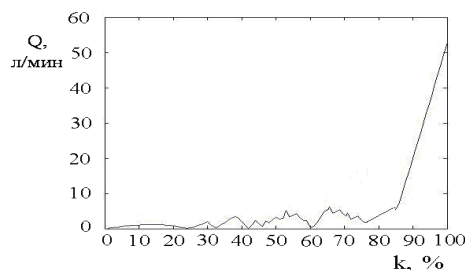


Рис. 7. Зависимость абсолютной погрешности моделирования расхода газовой среды ($\Delta_{\max} Q$) от процента открытия регулирующей арматуры (k) на 1,8 секунде переходного процесса

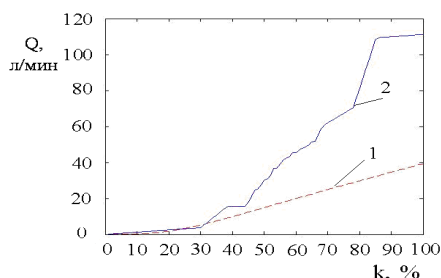


Рис. 8. Зависимость расхода газовой среды (Q) от процента открытия регулирующей арматуры (k): 1 – результирующая зависимость работы модели на 0,25 секунде переходного процесса; 2 – экспериментальная зависимость

По-прежнему высокий уровень погрешности сохраняется только во временном диапазоне от 0 до 0,74 секунды. Характер поведения модели в этом диапазоне хорошо демонстрирует зависимость расхода от процента открытия для 0,25 секунды моделирования в сравнении с экспериментальной кривой (рис. 8).

В этом временном диапазоне целесообразней использовать математическую модель (4) с учётом следующих особенностей:

- в случае моделирования ситуации при полностью открытой запорной арматуре и вышедшем на рабочий режим насосном блоке (т.е. изменяется состояние только регулирующей арматуры), использовать на данном временном отрезке значения расхода по экспериментальной кривой – рис. 3. Данное утверждение обосновывается технологическими особенностями регулирующей арматуры фирмы Velimo [9], для которой время полного хода из закрытого в открытое состояние равно 150 с, что учитывается при моделировании и позволяет на начальном временном отрезке зафиксировать расход;

- при моделировании начальных условий, исходя из неустановившегося состояния технологического оборудования: при включении насосного блока и/или изменении состояния запорной арматуры, использовать нулевое значение расхода при любом проценте открытия регулирующей арматуры.

С учётом всех описанных выше математических выкладок и реальных технологических ограничений создан программно-математический блок, моделирующий работу пневматической схемы АСКМ ОА и пригодный для дальнейших исследований в части автоматизации процессов регулирования расхода газовых сред.

Выводы

Основываясь на приведенных выше результатах моделирования, сформулируем основные выводы:

- математическая модель расхода газовой среды для АСКМ ОА, в виде функциональной зависимости (4), обеспечивает моделирование переходных процессов в зависимости от времени и процента открытия регулирующей арматуры;

- полученная модель уточнена, исходя из реальных данных в части расхода газовой среды при различных режимах работы АСКМ ОА;

- погрешности работы уточненной модели относительно экспериментальных результатов приемлемы при всех режимах работы имитируемого технологического оборудования и составляют в части максимальной абсолютной погрешности – 6,42 л/мин., а для максимальной относительной погрешности – 14,18 %;

– созданное на базе рассмотренной уточненной модели программно-математическое обеспечение прошло верификацию и пригодно для дальнейших исследований при создании систем автоматического регулирования расхода газовых сред, аналогичных АСКМ ОА.

Литература

1. Фирсов, С.Н. Особенности построения процесса регулирования для автоматизированной системы мониторинга объемной активности йодов, золей и инертных радиоактивных газов [Текст] / С.Н. Фирсов, А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – №2. – С. 7-13.
2. Фирсов, С.Н. Синтез ПИД-регулятора расхода газовых сред системы радиационного контроля [Текст] / С.Н. Фирсов, А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2011: тез. докл. Всеукраїнської науково-технічної конференції 22 – 25 листопада 2011 р.* – Х., 2011. – С.14.
3. Чумаченко, А.В. Автоматизированный выбор «рабочей точки» внутри области устойчивости в плоскости параметров управляющего контура системы стабилизации ракеты-носителя [Текст] / А.В. Чумаченко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 18, 2003. – С. 57-68.
4. Айзенберг, Я.Е. Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов [Текст] / Я.Е. Айзенберг, В.Г. Сухоребрий. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
5. Баглей, С.Г. Дифференциальные уравнения неустановившегося движения воздуха по рудничным воздуховодам [Текст] / С.Г. Баглей, П.А. Воронин // *Сборник научных трудов СевКавГТУ*. – 2002. – №1. – С. 17-29.
6. ЛБМВАК группа – мембранные микронасосы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lbmck.ua>. – 20.02.12 г.
7. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение. – 1992. – 672 с.
8. Расходомер газа ультразвуковой АРГ-микро [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dars.com.ua>. – 15.02.12 г.
9. Шаровые краны с электроприводом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belimo.com.ua>. – 02.02.12 г.

Поступила в редакцию 10.08.2012

Рецензент: канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела 13010 А.Е. Лукьянович, НПП ХАРТРОН-АРКОС, Харьков.

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИТРАТИ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄМНОЇ АКТИВНОСТІ ЙОДІВ, ЗОЛІВ ТА ІНЕРТНИХ РАДІОАКТИВНИХ ГАЗІВ

О.В. Чумаченко

Розглядаються особливості побудови математичної моделі витрати газів для автоматизованої системи моніторингу об'ємної активності йодів, золів та інертних радіоактивних газів. Здійснений аналіз існуючого математичного апарату, що моделює процес переміщення газів у трубопроводах різної конфігурації та виконання. Сформована спрощена математична модель витрати газів при різних положеннях регулюючого органу. Отримані, в ході апробації, результати у вигляді залежності витрати газів від відсотка відкриття регулюючої арматури в прив'язці до часу моделювання оцінені виходячи з реальних значень, які отримані на дослідницькому стенді. Зроблено висновок про можливість застосування цієї математичної моделі.

Ключові слова: математична модель витрати газів, вентиляційні системи, автоматизована система радіаційного контролю, ПИД-регулятор, радіаційна безпека, регулювання, витрати газів.

CREATION OF MATHEMATICAL MODEL OF THE GAS FLOW RATE FOR THE AUTOMATED SYSTEM OF MONITORING OF VOLUMETRIC ACTIVITY OF IODINE, PARTICULATE AND NOBLE GASES

A.V. Chumachenko

Features of creation of mathematical model of a gas flow rate for the automated system of volumetric's monitoring activity of iodine, particulate and noble gases are considered. The analysis of the existing mathematical apparatus modeling process of gases moving in the pipelines of a various configuration and execution is carried out. The simplified mathematical model of a gas flow rate is created at various positions of regulator. The results received during approbation in the form of dependence of a gas flow rate on percent of the regulating valve opening and on the time of modeling are estimated depending on the real gas flow rate values received at the research stand. The conclusion about possibility of application of this mathematical model is made.

Keywords: mathematical model of gas flow rate, ventilating systems, radiation monitoring system, PID-control, regulation, gas flow rate.

Чумаченко Алексей Валентинович – канд. техн. наук, начальник отд. 13060 НПП ХАРТРОН-АРКОС, Харьков, Украина, e-mail: oleksiychumachenko@rambler.ru.