

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.07

УДК 661.832; 66.012-52

Р.Ю. Дадиев¹, А.Г. Шумихин², Д.К. Корнилицин²¹ООО «Спутник-2», Пермь, Россия²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия**ВИРТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ВЛАЖНОСТИ КСЛ
НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СУШКИ
В ПЕЧИ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ**

Рассматривается задача измерения влажности хлористого калия в интервале значений, соответствующих зоне выгрузки при сушке его в печи с кипящим слоем (КС), решение которой позволяет оптимизировать подачу топливного газа в печь с КС с целью улучшения технико-экономических показателей производства. Анализ литературных источников по методам инструментального поточного измерения влажности с достаточной точностью в интересующем диапазоне значений показал, что приборы, их реализующие, дороги и сложны в использовании. Поэтому в практике промышленного производства определение влажности хлористого калия после сушки осуществляется лабораторным анализом периодически отбираемых проб. В качестве альтернативы аппаратным средствам для задачи непрерывного мониторинга показателя качества предлагается использовать виртуальный анализатор (ВА). ВА представляет собой программно-аналитический комплекс, реализующий математическую модель связи показателя качества с текущими значениями измеряемых технологических параметров процесса.

Предложено использовать как ВА влажности хлористого калия на выходе аппарата сушки в КС аналитическую модель (АМ), построенную на основе уравнений материально-энергетического баланса процесса сушки и теоретико-эмпирических зависимостей между параметрами процесса сушки и показателем качества продукта. Разработана аналитическая модель процесса сушки в КС. На данных реального процесса оценено качество ее работы. В структуру ВА влажности на выходе печи КС входят аналитическая модель и статистические модели, построенные на основе методов регрессионного анализа, нечеткой логики и искусственных нейронных сетей. Они в задаче оценки влажности выступают как модели-эксперты. Кроме того, в структуру входят модели, учитывающие динамику технологического процесса, а также блок выбора по результатам оценивания моделями-экспертами значения показателя влажности. Разработанную аналитическую модель предлагается использовать также при формировании обучающих выборок статистических моделей в составе предлагаемой структуры ВА. При включении ВА в работу первоначальная актуализация моделей-экспертов осуществляется путем их обучения на результатах прогнозирования влажности АМ.

Ключевые слова: хлористый калий, сушка в кипящем слое, аналитическая модель сушки, виртуальный анализатор, экспериментально-статистические модели.

R.Yu. Dadiomov¹, A.G. Shumikhin², D.K. Kornilitsin²

¹ООО "Sputnik-2", Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

KCL MOISTURE VIRTUAL ANALYZER BASED ON ANALYTICAL MODEL OF DRYING IN A FLUIDIZED BED DRYER

The problem of measuring the moisture content of potassium chloride in the range of values corresponding to the outlet zone in a fluidized bed (FB) dryer is considered. Resolving of this problem allows optimizing the supply of fuel gas to the FB dryer in order to improve the technical and economic performance of production. The analysis of literary sources on the methods of instrumental flow measurement of humidity with sufficient accuracy in the range of values of interest showed that the devices that implement them are expensive and difficult to use. Therefore, in the practice of industrial production, the determination of the moisture content of potassium chloride after drying is carried out by laboratory analysis of periodically taken samples. It is proposed to use a virtual analyzer (VA) as an alternative to hardware sensors for the task of continuous monitoring of the quality indicator. VA is a software algorithmic complex that implements a mathematical model of the relationship between the quality indicator and the current values of the measured technological parameters of the process.

It is proposed to use an analytical model (AM) based on the equations of the material and energy balance of the drying process and theoretical and empirical dependencies between the parameters of the drying process and the quality index of the product as potassium chloride moisture VA at the outlet of the FB dryer. An analytical model of the drying process in the fluidized bed dryer has been developed. The quality of the model was assessed on the basis of a real process data. The structure of KCL moisture VA at the outlet of the FB dryer includes an analytical model and statistical models built on the basis of methods of regression analysis, fuzzy logic and artificial neural networks. They act as expert models in the task of estimation of the moisture value. In addition, the structure includes models that take into account the dynamics of the technological process, as well as a selection block based on the results of evaluating the value of the moisture index by expert models. The developed analytical model is also proposed to be used in the formation of samples to train the statistical models as part of the proposed VA structure. When the VA is put in operation, the initialization of the expert models is carried out by training them on the results of predicting the moisture content by AM.

Keywords: *potassium chloride, fluidized bed drying, analytical model of drying, virtual analyzer, experimental statistical models.*

Введение. Хлористый калий – основной вид продукции калийной промышленности. В производстве хлористого калия процессы сушки являются завершающей технологической операцией, от которой в значительной степени зависит качество продукции, а также величина

удельного энергопотребления и капитальных затрат, поскольку на современных калийных предприятиях требуется высушивать многотоннажные потоки, порядка 100 т/ч и выше.

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов сушки KCl является сушка в аппаратах кипящего слоя. Схема технологического процесса сушки в печи КС представлена на рис. 1.

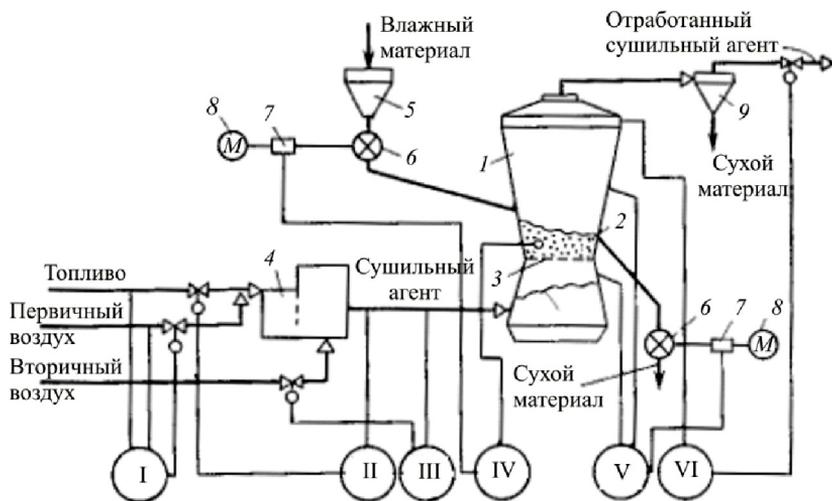


Рис. 1. Схема регулирования процесса сушки в сушилке с кипящим (псевдооживленным) слоем: 1 – сушилка; 2 – кипящий слой; 3 – решетка; 4 – топка; 5 – промежуточный бункер; 6 – питатели; 7 – вариаторы; 8 – электродвигатели; 9 – циклон. I – регулятор расхода топлива, II – регулятор расхода воздуха, III – регулятор расхода сушильного агента, IV – регулятор расхода сырья, V – регулятор перепада давления, VI – регулятор давления разрежения в верхней части сушилки

На производстве ставится задача улучшения технико-экономических показателей работы технологических установок. В частности, для аппарата сушки КС эта задача сводится, в том числе, к снижению расхода топлива, повышению выхода готового продукта, увеличению интервалов обслуживания и решается путем повышения качества управления технологическим процессом сушки. Инструментальное поточное измерение показателя содержания воды в выходном продукте с достаточной точностью, как правило, затруднено вследствие сложности измерения влагосодержания в диапазоне 0–1 %. Применяемые на производстве приборы поточного измерения влажности на основе метода ИК-спектроскопии не достигают необходимой точности и требуют дополнительных средств коррекции показаний [1, 2]. То же

самое касается применения приборов, использующих СВЧ метод. В то же время приборы, использующие радиационный метод и метод спектрофотометрии, достаточно дороги и сложны в использовании. На производстве определение доли H_2O в продукте осуществляется путем проведения лабораторного анализа периодически отбираемых проб, при этом результат анализа пробы становится известен через продолжительный промежуток времени после отбора, измеряемый часами. Для решения проблемы прогнозирования показателя влажности продукта в режиме реального времени с целью улучшения качества управления процессом сушки предлагается использовать виртуальный анализатор.

Виртуальный анализатор качества представляет собой программно-алгоритмический комплекс, реализующий математическую модель связи показателя качества технологического процесса с текущими значениями измеряемых параметров процесса. Основным назначением виртуальных анализаторов является повышение уровня информационно-аналитического обеспечения технологического персонала и создание условий для оптимального управления, как отдельными технологическими процессами, так и всем технологическим циклом производства [3].

Известно множество реализаций ВА для различных типов процессов в нефтеперерабатывающих производствах [4–6], а также в производстве минеральных удобрений [7]. В данной работе для решения поставленной задачи предлагается использовать ВА, построенный с использованием аналитической модели технологического процесса сушки КС1 в аппарате КС, полученной на основе знаний в области процесса сушки в кипящем слое.

Построение аналитической модели. Существует значительное количество работ, посвященных моделированию процессов сушки сыпучих материалов, в частности, сушки в аппаратах кипящего слоя. При этом многочисленные модели, описывающие структуру кипящего слоя, отражают только отдельные стороны явления и в связи со сложностью системы и большим числом внутренних и внешних параметров пригодны к использованию в качестве основы для построения эмпирических корреляций и зависимостей [8–10]. Математическая модель строится на базе материально-энергетического баланса сушки, использующего упрощения и эмпирические зависимости, определенные, например, в работе [11]. Материально-энергетический баланс обезвоживания определяется следующими уравнениями:

$$M(1 - U_n) = (M - U)(1 - U_k); \quad (1)$$

$$U = R(q/q_1); \quad (2)$$

$$q_1 = (q_{исп} + 2,01t_{сл}) + (m-1)C_{ТВ}t_{сл}; \quad (3)$$

$$m = (1-U_k)/(U_H - U_k); \quad (4)$$

$$q = (Q + 0,6t_{сл})(1-t_{сл}/t_r)\eta, \quad (5)$$

где U_k – конечная влажность, массовая доля; U_H – начальная влажность, массовая доля; U – количество испаряемой влаги, кг/с; q – количество теплоты, передаваемой в слое теплоносителем на 1 кг сожженного топлива, Дж/кг; q_1 – количество теплоты на испарение 1 кг влаги, Дж/кг; m – расход влажного материала, соответствующий 1 кг испаренной влаги, кг/кг влаги; $C_{ТВ}$ – теплоемкость материала (KCl), Дж/(кг·К); $t_{сл}$ – температура кипящего слоя, °С; t_r – температура теплоносителя, °С; Q – теплотворная способность газа, Дж/кг; $q_{исп}$ – теплота испарения воды при 0 °С, Дж/кг; η – коэффициент потерь теплоты в топке и аппарате КС; M – количество влажного материала, поступающего на сушку, кг/ч; R – общий расход топлива, кг/с.

Температура газа в подрешетном пространстве в зависимости от расхода топливного газа рассчитывается по эмпирической формуле согласно [11]:

$$t_r = 2920 \cdot \beta / \alpha + 0,43. \quad (6)$$

При этом коэффициент α вычисляется по формуле

$$\alpha = L / (R \cdot 9,4), \quad (7)$$

где β – коэффициент, учитывающий потери тепла в топке; α – коэффициент избытка воздуха; L – часовой расход вторичного воздуха, $\text{нм}^3/\text{с}$.

В результате преобразований получим

$$t_{сл} = \frac{-((U/R \cdot \eta)(2,01 + (m-1) \cdot C_{ТВ}) - 0,6 + (Q/t_r))}{(1,2/t_r)} + \sqrt{\frac{((U/R \cdot \eta)(2,01 + (m-1) \cdot C_{ТВ}) - 0,6 + (Q/t_r))^2 - 4 \cdot (0,6/t_r)((U/R \cdot \eta)q_{исп} - Q)}{(1,2/t_r)}}. \quad (8)$$

Зависимость конечной влажности от температуры слоя выражается эмпирической формулой:

$$U = A \cdot e^{(-kt_{\text{сн}})}, \quad (9)$$

где коэффициенты A и k находятся в зависимости от множества условий ведения процесса, в частности от температуры окружающего воздуха, гранулометрического состава продукта, и определены эмпирическим путем и в настоящей работе принимают следующие значения:

$$A = 0,02237, \text{ мас.}; k = -0,025, \frac{1}{\text{°C}}.$$

Модель на основе материально-энергетического баланса реализована с помощью средств пакета математических вычислений MATLAB. Работа модели была проверена на массиве исторических данных из архива АСУТП, полученных на функционирующем оборудовании. При этом отборы проб для определения влажности продукта в лаборатории проводились с интервалом 600 с в течение рабочей смены. На графике, представленном на рис. 2, ряд, обозначенный голубой линией, составляет выборка значений конечной влажности продукта U_k в реальном процессе (рис. 2, а). Ряд, обозначенный зеленой линией, представляет результат работы аналитической модели при обозначенных выше значениях ее параметров, а также значениях расхода кристаллизата на входе и начальной влажности, указанных на рис. 2, б, в.

Если имеется выборочный закон распределения случайных наблюдений (из эксперимента) и закон распределения генеральной совокупности (определяемый моделью), то оценку адекватности аналитической модели можно осуществить с применением критерия согласия Пирсона (χ^2 -критерия) [12].

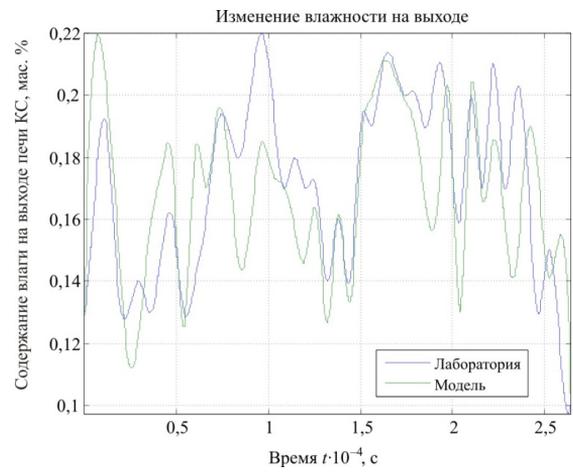
Для применения χ^2 -критерия весь диапазон изменения случайной величины в выборке объема N разбивается на r интервалов. Количество интервалов при вычислении критерия согласия Пирсона определяется по формуле

$$r = 1 + 3,322 \cdot \lg(N), \quad (10)$$

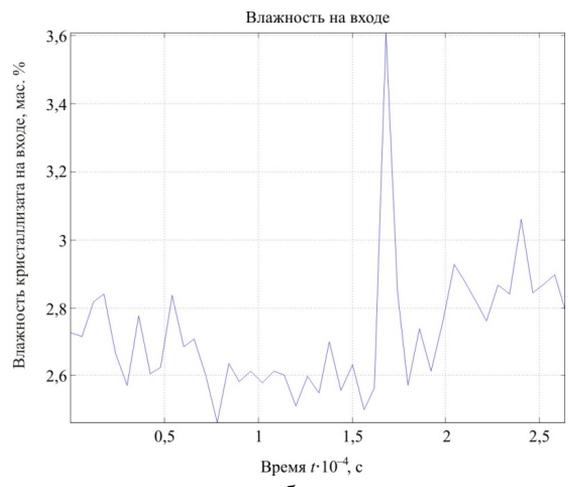
где N – количество значений в выборке, r – количество интервалов.

Количество интервалов r (для $n = 45$) равно 6.

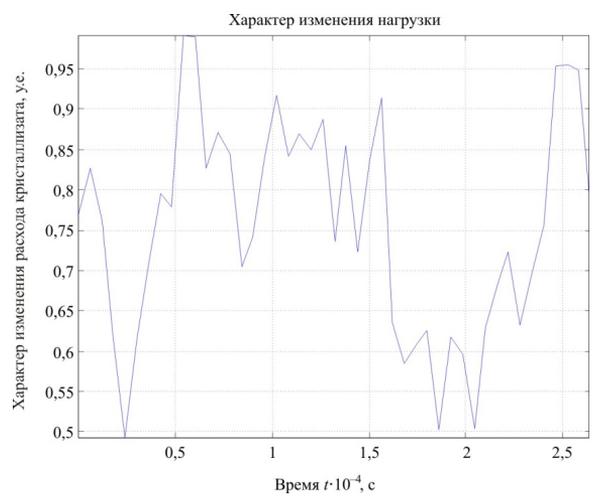
На основе максимального и минимального значений показателя остаточной влажности в рассматриваемой выборке и заданного количества интервалов вычислен шаг интервала составляет 0,02 мас. %.



а



б



в

Рис. 2. Результаты работы аналитической модели

Расчет частот результатов, представленных на рис. 2, а, приведен в таблице.

Результаты расчета частот

Номер интервала	Граница интервала, мас. %		Значений частоты попадания в интервал	
	нижняя	верхняя	расчетные	лабораторные
1	0,1	0,12	2	2
2	0,12	0,14	8	10
3	0,14	0,16	11	6
4	0,16	0,18	11	9
5	0,18	0,2	10	13
6	0,2	0,22	3	5

Расчетное значение χ^2 -критерия вычисляется по формуле

$$\chi_{\text{расч}}^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (11)$$

где $\chi_{\text{расч}}^2$ – расчетное значение критерия χ^2 ; O_i – частота попадания в i -й интервал расчетных значений по модели; E_i – частота попадания в i -й интервал лабораторных значений; r – количество интервалов.

Расчетное значение критерия $\chi_{\text{расч}}^2$ для данных таблицы равно 6,5.

По таблице критических значений $\chi_{\text{крит}}^2$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\lambda = r - 3 = 6 - 3 = 3$ находится значение $\chi_{\text{крит}}^2$, равное 7,8.

При этом $\chi_{\text{расч}}^2 < \chi_{\text{крит}}^2$, т.е. расчетное значение критерия оказалось меньше критического. Таким образом, гипотеза о равенстве (согласии) частот не отклоняется и модель признается адекватной.

Для оценки качества разработанной модели можно дополнительно использовать и другие показатели, например:

1. Коэффициент корреляции. Отражает тесноту линейной связи между расчетными значениями модели и экспериментальными.

$$R_r = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \cdot \sum(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}. \quad (12)$$

2. Среднюю ошибку аппроксимации

$$\Delta = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{N} \cdot 100. \quad (13)$$

3. Среднеквадратическую ошибку аппроксимации (RMSE)

$$sko_delta = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}. \quad (14)$$

4. Максимальную ошибку аппроксимации

$$max_delta = \max (abc (y_i - \hat{y}_i)). \quad (15)$$

Здесь \hat{y}_i – расчетное значение по модели; y_i – экспериментальное значение; $\bar{\hat{y}}$ – оценка математического ожидания вектора расчетных значений; \bar{y} – оценка математического ожидания вектора экспериментальных значений; N – количество значений в векторе выхода модели.

Значения показателей качества аналитической модели (12)–(15):
 коэффициент корреляции R 0,673
 средняя относительная ошибка 0,006
 среднеквадратическая ошибка RMSE 0,023
 максимальная ошибка 0,057

Информацию для оценки точности аналитической модели могут дать и приведенные погрешности относительно диапазона значений лабораторных анализов в исследованиях и диапазона соответствующих расчетов по аналитической модели.

Относительная приведенная погрешность рассчитывается по формуле

$$Y = \frac{\Delta}{X_n} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где Y – относительная приведенная погрешность аналитической модели; Δ – средняя абсолютная погрешность измерений; X_n – нормирующее значение шкалы. В данной работе в качестве X_n использованы разница между максимальным и минимальным значениями вектора лабораторных анализов, равная 0,12 мас.% и разница между максимальным и минимальным значениями вектора расчетных значений, равная 0,1132 мас.%.

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N}, \quad (17)$$

где Δ – средняя абсолютная погрешность аналитической модели.

Относительная приведенная погрешность аналитической модели для диапазона значений лабораторных анализов (16) численно равна 14,5 %. Относительная приведенная погрешность аналитической модели на основе диапазона расчетов модели (16) численно равна 15,3 %.

Структура ВА влажности КС1. Предлагается использовать в составе ВА ряд моделей, работающих независимо. Модели в составе ВА строятся на основе следующих методов: регрессионный анализ, методы на базе нечеткой логики, искусственные нейронные сети. Результат расчета каждой модели участвует в алгоритме выбора наиболее приемлемого значения.

В работах [13, 14] приведен алгоритм, использующий подобный подход. В расчете прогнозного значения ВА используется несколько моделей-экспертов, однако отличие предлагаемого подхода состоит в учете динамики процесса и использовании алгоритма нечеткого вывода в качестве одной из моделей-экспертов, что позволяет учитывать опыт операторов процесса. Структура ВА показана на рис. 3.

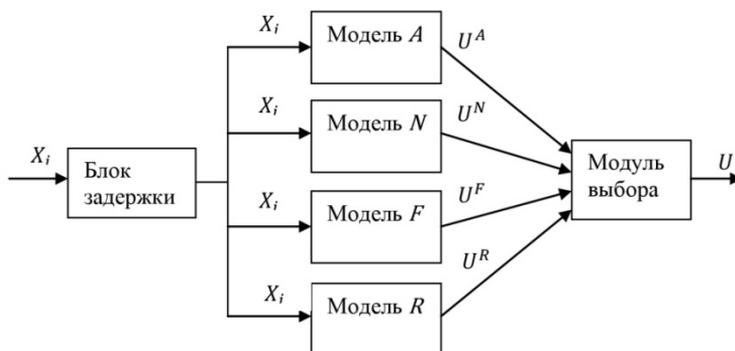


Рис. 3. Структура виртуального анализатора влажности продукта на выходе печи КС

Вектор значений технологических параметров X_i , соответствующих i -му моменту времени с учетом динамики объекта в блоке задержки, формирующего задержку во времени от текущего времени t значений измерительной информации в каналах передачи сигналов, является входом для четырех алгоритмических модулей моделей-экспертов. Передаточные функции по каналам определяются методами идентифика-

ции технологического объекта с использованием подхода, описанного в [15–17].

Модуль N реализует нейросетевую модель процесса, модуль F реализует модель, построенную на основе нечеткой логики, модуль R представляет собой регрессионную модель процесса, модуль A – аналитическую модель, базирующуюся на знаниях о физической сущности процесса. Результатом работы каждого из модулей будет прогнозируемое данной моделью значение влажности высушенного продукта. Вектор прогноза влажности, состоящий из прогнозов влажности каждой из моделей $(U_i^A, U_i^N, U_i^F, U_i^R)$ является входом алгоритма расчета наиболее приемлемого значения показателя влажности (модуль выбора), выход которого принимается за результат работы ВА. В качестве этого алгоритма используется метод мажорирования, в отличие, например, от [13, 14], где использован метод частичных наименьших квадратов для определения наиболее точного результата из имеющихся.

Использование АМ для формирования обучающей выборки.

В практике эксплуатации печи КС существует недостаток эмпирических данных, необходимых для корректного обучения моделей в составе ВА. Как правило, сама выборка данных, в частности, лабораторных анализов влажности продукта на выходе печи мала и в ней недостаточно представлены или отсутствуют данные технологических режимов в верхних и нижних диапазонах показателя качества. В работе [18] показано использование аналитической модели для доформирования обучающей выборки, для уточнения работы прогнозирующей модели на базе одного из расчетных методов. При этом аналитическая модель в работе [17] не используется в качестве ВА. В отличие от этого подхода АМ в настоящей работе используется как для формирования обучающей выборки для моделей-экспертов N, F, S , так и в качестве модели-эксперта.

Заключение. Разработана аналитическая модель процесса сушки хлорида калия в печи кипящего слоя для использования в построении виртуального анализатора влажности продукта на выходе аппарата КС. Работа модели была проверена на массиве значений технологических параметров, формируемых АСУТП процесса сушки и значений лабораторных измерений влажности проб, отобранных в ходе эксперимента. Обоснован вывод об адекватности и возможности использования аналитической модели для построения виртуального анализатора влажности продукта. Представлена структура ВА, включающая не-

сколько моделей-экспертов. Предложено использование аналитической модели в качестве источника данных при формировании выборки для обучения моделей-экспертов.

Список литературы

1. Собина Е.П. Исследование источников неопределенности измерений влажности твердых веществ методом ИК-спектроскопии // *Certified Reference Materials*. – 2007. – № 4. – С. 20–24.
2. Block B., Lipták B.G., Shinsky F.G. *Instrument Engineer's Handbook // Process Control and Optimization*. – 2006. – Vol. II, Chapter 8.22: Dryer Controls. – CRC Press, 2006. – 2302 p.
3. Мусаев А.А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными ТП // *Автоматизация в промышленности*. – 2003. – № 8. – С. 28–33.
4. Опыт разработки системы виртуального анализа показателей качества продуктов установок каталитического риформинга бензиновых фракций и системы их подстройки в режиме реального времени / А.Г. Шумихин, М.П. Зорин, А.М. Немтин, В.Г. Плехов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2017. – № 2. – С. 45–62.
5. Гурьева Е.М., Ибатуллин А.А. Виртуальные анализаторы качества в нефтепереработке // *Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: материалы VI междунар. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых / Омский гос. техн. ун-т*. – Омск, 2016. – С. 181–186.
6. Александров И.М. Построение виртуального датчика на примере датчика концентрации этан-этиленовой колонны // *Вестник АГТА*. – 2011. – № 5. – С. 45–51.
7. Системы управления качеством производства минеральных удобрений на основе виртуальных анализаторов / Н.А. Туманов, Д.Н. Туманов, В.М. Чадаев, Н.Н. Бахтадзе // *Автоматизация в промышленности*. – 2003. – № 8. – С. 33–35.
8. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1968. – 360 с.
9. Алексанян И.Ю., Титова Л.М., Нугманов А.Х.-Х. Моделирование процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое // *Техника и технология пищевых производств*. – 2014. – № 3. – С. 96–102.
10. Овчинников Л.Н. Моделирование процесса сушки минеральных удобрений во взвешенном слое // *Химия и химическая технология*. – 2009. – Т. 52, вып. 7. – С. 122–124.
11. Каганович Ю.Я. Промышленное обезвоживание в кипящем слое. – М.: Химия, 1990. – 144 с.

12. Прикладной статистический анализ: учеб. пособие для вузов / С.В. Алексахин, А.В. Балдин, А.Б. Николаев, В.Ю. Строганов. – М.: Приор, 2001. – 221 с.

13. Francisco Alexandre Andrade de Souza, Computational Intelligence Methodologies for Soft Sensors Development in Industrial Processes. Ph.D. theses / University of Coimbra Faculty of Sciences and Technology Department of Electrical and Computer Engineering. – Coimbra, 2014. – 184 p.

14. Francisco Souza, Rui Araújo. Mixture of partial least squares experts and application in prediction settings with multiple operating modes // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2014. – Vol. 130. – P. 192–202.

15. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Применение нейросетевых динамических моделей в задаче параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2015. – № 3. – С. 21–38.

16. Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S. Identification of a complex control object with frequency characteristics obtained experimentally with its dynamic neural network model // *Automation and Remote Control*. – 2015. – Vol. 76, № 4. – С. 650–657.

17. Шумихин А.Г., Александрова А.С. Идентификация управляемого объекта по частотным характеристикам, полученным экспериментально на нейросетевой динамической модели системы управления // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 729–740.

18. Самотылова С.А., Торгашов А.Ю. Построение виртуального анализатора процесса ректификации в условиях малой обучающей выборки данных // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – Т. 2. – С. 10–13.

References

1. Sobina E.P. Issledovanie istochnikov neopredelennosti izmerenij vlazhnosti tverdyh veshhestv metodom IK-spektroskopii [Investigation of sources of uncertainty in measurements of moisture content of solids by IR spectroscopy]. *Certified Reference Materials*, 2007, no. 4, pp. 20-24.

2. Block B., Lipták B.G., Shinskey F.G. Instrument Engineer's Handbook. *Process Control and Optimization*, vol. II, Chapter 8.22: Dryer Controls. CRC Press, 2006, 2302 p.

3. Musaev A.A. Virtual'nye analizatory: kontseptsiiia postroeniia i primeneniia v zadachakh upravleniia nepreryvnymi tekhnologicheskimi protsessami [Virtual analyzers: the concept of construction and application in the tasks of managing continuous technological process]. *Journal Automation In Industry*, 2003, no.8, pp. 28-33.

4. Shumikhin A.G., Zorin M.P., Nemtin A.M., Plekhov V.G. Opyt razrabotki sistemy virtual'nogo analiza pokazatelei kachestva produktov ustanovok kataliti-

cheskogo riforminga benzinovykh fraktsii i sistemy ikh podstroiki v rezhime real'nogo vremeni [Experience in developing a system of virtual analysis of quality indicators of products of catalytic reforming units of gasoline fractions and a real-time adjustment system for them.]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaja tekhnologija i biotekhnologija*, 2017, no.2, pp. 45-62.

5. Gur'eva E.M., Ibatullin A.A. Virtual'nye analizatory kachestva v neftepererabotke [Virtual quality analyzers in petrochemical refinery]. *Avtomatizacija, mehatronika, informacionnye tehnologii, materialy VI mezhdunar. nauch.-tehn. internet-konf. molodyh uchenyh*. Omsk, 2016, pp. 181-186.

6. Aleksandrov I.M. Postroenie virtual'nogo datchika na primere datchika koncentracii jetan-jetilenovoj kolonny [Building a virtual sensor using an example of a sensor ethane-ethylene column concentration]. *Vestnik AGTA*, 2011, no. 5, pp.45-51.

7. Tumanov N.A., Tumanov D.N., Chadaev V.M., Bahtadze N.N. Sistemy upravlenija kachestvom proizvodstva mineral'nyh udobrenij na osnove virtual'nyh analizatorov [Quality management systems for the production of mineral fertilizers based on virtual analyzers]. *Journal Automation In Industry*, 2003, no.8, pp.33-35

8. Romankov P.G., Rashkovskaja N.B. Sushka vo vzveshennom sostojanii [Suspended Drying]. Moscow, 1968. 360 p.

9. Aleksanjan I.Ju., Titova L.M., Nugmanov A.H.-H. Modelirovanie processa sushki dispersnogo materiala v kipjashhem sloe [Simulation of the process of drying dispersed material in a fluidized bed]. *Tehnika i tehnologija pishhevykh proizvodstv*, 2014, no.3, pp. 96-102.

10. Ovchinnikov L.N. Modelirovanie processa sushki mineral'nyh udobrenij vo vzveshennom sloe [Modeling the process of drying mineral fertilizers in a fluidized bed]. *Himija i himicheskaja tehnologija*, 2009, no. 7, vol. 52, pp. 122-124.

11. Kaganovich Ju.Ja. Promyshlennoe obezvozhivanie v kipjashhem sloe [Industrial fluidized bed dewatering]. Moscow, Himija, 1990, p.144.

12. Aleksakhin S.V., Baldin A.V., Nikolaev A.B., Stroganov V.Iu. Prikladnoi statisticheskii analiz [Applied statistical analysis]. Moscow, 2001, 221 p.

13. Francisco Alexandre Andrade de Souza. Computational Intelligence Methodologies for Soft Sensors Development in Industrial Processes. Ph.D. theses, Coimbra, 2014, 184 p.

14. Francisco Souza, Rui Araújo. Mixture of partial least squares experts and application in prediction settings with multiple operating modes. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, January, 2014, vol. 130, pp.192-202.

15. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. Primenenie neirosetevykh dinamičeskikh modelei v zadache parametriceskoi identifikatsii tekhnologičeskogo ob'ekta v sostave sistemy upravlenija [Application of neural network dynamic models in the problem of parametric identification of a technological object as part of a control system]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*

politekhnikeskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiia i biotekhnologiia, 2015, no. 3, pp. 21-38.

16. Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S. Identification of a complex control object with frequency characteristics obtained experimentally with its dynamic neural network model. *Automation and Remote Control*, 2015, no. 4, pp. 650-657.

17. Shumikhin A.G., Aleksandrova A.S. Identifikatsiia upravliaemogo ob"ekta po chastotnym kharakteristikam, poluchennym eksperimental'no na neurosetevoi dinamicheskoi modeli sistemy upravleniia [Identification of a controlled object by frequency characteristics obtained experimentally with a neural network dynamic model of a control system]. *Komp'juternye issledovaniia I modelirovanie*, 2017, no. 5, pp. 729-740.

18. Samotylova S.A., Torgashov A.Iu. Postroenie virtual'nogo analizatora protsessa rektifikatsii v usloviiakh maloi obuchaiushchei vyborke dannykh [Building a virtual analyzer of the rectification process under conditions of a small training data sample]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologijah: Sb. trudov mezhdunar. nauch. Konf*, Saint Petersburg, 2019, pp.10-13.

Получено 22.07.2020

Об авторах

Дадиев Роман Юрьевич (Пермь, Россия) – руководитель направления «Цифровое производство» ООО «Спутник-2», e-mail: roman.dadiomov@sputnic2.ru

Шумихин Александр Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры оборудования и автоматизации химических производств (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: atp@pstu.ru).

Корнилицин Дмитрий Константинович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры оборудования и автоматизации химических производств (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: kornilitsin.dima@mail.ru).

About the authors

Roman Yu. Dadiomov (Perm, Russian Federation) – head of “Digital Enterprise” department, “Sputnic-2” LLC, e-mail: roman.dadiomov@sputnic2.ru

Aleksandr G. Shumikhin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Equipment and Automation of Chemical Production, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: atp@pstu.ru).

Dmitriy K. Kornilitsin (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Equipment and Automation of Chemical Production, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: kornilitsin.dima@mail.ru).