

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333:631.878

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-19-26

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ГУМИНОВЫХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**СОРОКИН КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ**, канд. техн. наук

7623998@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Развитие органического сельскохозяйственного производства в России сдерживается по причине отсутствия необходимых органических удобрений, производство которых не обеспечено современными технологическими линиями по переработке торфа, бурого угля, сапропеля и биогумуса. В связи с потребностью в таких технологических линиях разработана математическая модель, описывающая гидромеханические и механические процессы, позволяющая сделать выбор параметров режима работы технологической линии. Впервые предложенная модель может быть использована при формировании суспензии с необходимой дисперсностью в гидромеханическом очистителе и реакторе. Предложена методика по сборке технологических линий по переработке органического сырья на основе модульного оборудования, обеспечивающих производительность и качество гуминовых удобрений в промышленных объемах. Показано, что представленная математическая модель хорошо согласуется с реальным технологическим производством и может быть использована для теоретических и инженерных расчетов. Совершенствование математической модели процесса работы технологической линии по переработке органического сырья с применением теории искусственных нейронных сетей может в дальнейшем использоваться в системе автоматизации технологических операций и мониторинга показателей качества работы модульного оборудования, при переработке органического сырья, что обеспечит новый уровень синтеза сложных технических систем в интересах сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: математическая модель, режимы работы технологической линии, переработка органического сырья, апробация системы уравнений, модульное оборудование.

Формат цитирования: Сорокин К.Н. Математическая модель для разработки технологической линии по производству гуминовых удобрений на основе модульного оборудования // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 19-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-19-26>.

© Сорокин К.Н., 2022



ORIGINAL PAPER

MATHEMATICAL MODEL OF A TECHNOLOGICAL LINE BASED ON MODULAR EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF HUMIC FERTILIZERS**KONSTANTIN N. SOROKIN**, PhD (Eng)

7623998@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Bld 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The development of organic agricultural production in Russia is hampered by the lack of the necessary organic fertilizers as modern technological lines processing peat, brown coal, sapropel, and biohumus are still unavailable. Because of the need for such technological lines, a mathematical model has been developed to describe the hydromechanical and mechanical processes, enabling operators to select the operating mode parameters of the technological line. For the first time, the proposed model can be used to form a suspension with the required fineness in a hydromechanical cleaner and reactor. The authors propose a technique for assembling technological lines based on modular equipment to process organic raw materials that ensures the industrial productivity and quality of humic fertilizers. It is shown that the presented mathematical model fully complies with the real technological production requirements and can be used for theoretical and engineering analysis. The mathematical model of the technological line processing organic raw materials is based on the theory of artificial neural networks. The model can be further improved to be used in the system for automatizing technological operations and monitoring the quality indicators of modular equipment in the processing of organic raw materials. This will provide a new level of synthesizing complex technical systems, which will be beneficial for agricultural production.

Key words: mathematical model, operating modes of the technological line, processing of organic raw materials; proof of the system of equations, modular equipment.

For citation: Sorokin K.N. Mathematical model of a technological line based on modular equipment for the production of humic fertilizers. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 19-26. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-19-26>.

Введение. Развитие органического сельскохозяйственного производства в России в соответствии с Указом Президента от 3 августа 2018 г. № 280 сдерживается ввиду отсутствия необходимых органических удобрений, производство которых не обеспечено современными технологическими линиями по переработке торфа, бурого угля, сапропеля и биогумуса. Ежегодная потребность в технологических линиях на основе модульного оборудования составляет 120...130 шт. Существуют проблемы и у машиностроителей относительно качества и производительности предлагаемого оборудования для производства гуминовых удобрений из органического сырья.

Цель исследования: разработать математическую модель выбора параметров режима работы технологической линии по переработке органического сырья; на основе математической модели предложить методику по сборке технологических линий по переработке органического сырья, обеспечивающих производительность и качество гуминовых удобрений в промышленных объемах.

Материалы и методы. Объектом исследования являются свойства и особенности функционирования промышленных технологических линий в регионах России и за рубежом на основе математической модели; оптимизация параметров функционирования оборудования в составе технологических линий.

Предметом исследования является особенность работы оборудования технологических линий, влияющей на организацию технологических процессов по производству органических удобрений. Рассматриваются математические модели и критерии оптимальности по выбору параметров режима работы технологических линий с учетом использования модульного оборудования при их сборке (модернизации), методы и алгоритмы решения задач.

Методика исследования основана на использовании методов системного анализа, математического моделирования и условной оптимизации оборудования в схеме технологической линии.

Результаты и их обсуждение

Определение математической модели, описывающей технологическую линию по производству комплексных удобрений из органического сырья (торф, бурый уголь, сапропель и биогумус). Математическую модель, описывающую взаимосвязи процессов работы модульного оборудования в составе технологической линии при производстве удобрений, на основании которого можно изучать закономерности его развития и давать прогноз разработки технологических линий на будущее, можно представить следующим образом:

$$S = (V, X, \sigma, F), \quad (1)$$

где $V \in E_m$ – внешние переменные и параметры (формируются на выходе из математической модели), которые зависят от требований заказчика и, как правило, являются требованиями к производимым комплексным удобрениям; $X \in E_n$ – внутренние переменные и параметры (такие, как производительность отдельных модульных агрегатов); $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_m)$ – функции связи внешних и внутренних переменных и параметров; $F = (F_1, \dots, F_n)$ – передаточная функция.

Выражение (1) может быть переписано как

$$\sigma(V, X) = 0, \quad (2)$$

$$X = F(V, X^0).$$

Переменные V и X не являются функциями времени, в связи с чем задача (2) является балансовой и нединамической. Графическое представление показано на рисунке 1.

Входными данными математической модели являются характеристики исходного органического сырья (торф, бурый уголь, сапропель, биогумус), используемого для производства комплексных удобрений.

Архитектура технологического процесса по производству комплексных удобрений зависит также от ассортимента выпускаемых комплексных удобрений I (комплексы удобрений для с.-х. культур или поддержания плодородия почв) и уровня автоматизации технологического процесса, Av .

Массив входных и выходных данных математической модели примет следующий вид:

$$V = (Q_{tech}, P, K_{ин}, C_1, \delta_2),$$

$$X = (\delta_1, T_b, I, Av).$$

Математическое описание пооперационной последовательности действий при производстве комплексных удобрений. Технологическая линия работает в периодическом режиме. Технологический процесс обеспечивается работой модулей в таком составе:

1) модуль весового дозирования и сепарирования. Предназначен для осуществления доставки со складского участка необходимого количества органического сырья, предварительно подсушенного до 25...30% влажности, размерностью частиц сырья не более 5...7 мм и механизированной загрузки его на лоток вибросепаратора, входящего в состав гидромеханического модуля;

2) гидромеханический модуль. Производит очистку суспензии органического сырья от песка и других включений с предварительным разрушением твердых частиц в сырье до размерности 200...250 мкм перед подачей в реактор;

3) модуль по переработке суспензии (реактор-дисмембратор-реактор). При помощи дисмембратора и кавитатора производятся диспергация и гомогенизация суспензии до получения необходимых качественных показателей по дисперсности от 0 до 100 мкм, по измельчению остаточных твердых частиц, с добавлением щелочи (или без щелочи) перед подачей ее на модуль тонкой фильтрации органических удобрений;

4) модуль тонкой фильтрации органических удобрений. Предназначен для очистки удобрений, поступающих из реактора, до размерности 100 мкм перед подачей их в следующий модуль.

5) модуль внесения и смешивания минеральных добавок. Предназначен для обеспечения автоматизированного дозирования микроэлементов в органические удобрения после фильтрации при подаче их в накопительную емкость;

6) модуль накопительной емкости и разлива органических удобрений. Предназначен для приема и хранения готовой продукции, расфасовки и отпуска ее покупателям.

На рисунке 2 представлен структурный вид математической модели технологического процесса на технологической линии.



Рис. 1. Общий вид математической модели технологической линии по производству комплексных удобрений различного типа:

- T_b – тип органического сырья;
- δ_1 – дисперсность органического сырья, мкм;
- I – ассортимент выпускаемых комплексных удобрений;
- Av – уровень автоматизации технологического процесса;
- Q_{tech} – производительность технологической линии по производству комплексных удобрений, л/ч;
- P – потребляемая мощность электроэнергии технологической линии, кВт/ч;
- $K_{ин}$ – коэффициент искусственного интеллекта модульного оборудования;
- C_1 – концентрация гуминовых солей, г/л;
- δ_2 – дисперсность готового продукта, мкм

Fig. 1. General view of a mathematical model of the technological line producing complex fertilizers of various types:

- T_b – the type of organic raw materials;
- δ_1 – the dispersion of organic raw materials, microns;
- I – the range of manufactured complex fertilizers;
- Av – the level of technological process automation;
- Q_{tech} – the productivity of the technological line producing complex fertilizers, l/h;
- P – the power consumption of the technological line, kW/h;
- $K_{ин}$ – the artificial intelligence coefficient of modular equipment;
- C_1 – the concentration of humic salts, g/l;
- δ_2 – the dispersion of the finished product, microns

Каждый модуль на выходе имеет переменные, которые являются результирующими в математической модели, а именно: в модуле весового взвешивания – $P_1, K_{ин1}$; в гидромеханическом модуле – $P_2, K_{ин2}$; в модуле по переработке суспензии (реакторе) – $P_3, K_{ин3}$; в модуле тонкой фильтрации органических удобрений – $P_4, K_{ин4}, \delta_2, C_1$; в модуле внесения и смешивания минеральных добавок – $P_5, K_{ин5}$; в модуле накопительной емкости и розлива органических удобрений – $P_6, K_{ин6}$.

Согласно данным рисунка 2 каждое модульное устройство текущего технологического процесса имеет свою производительность q_i . Таким образом, объем выпускаемого комплексного оборудования можно описать как экстремум функции и записать как

$$Q_{tech} = \min_{i \rightarrow m} (q_1, q_2, \dots, q_m),$$

где m – количество модульного оборудования, используемого в технологической линии по производству комплексных удобрений. При этом справедливо по производительности неравенство $q_1 \geq q_2 \geq \dots \geq q_m$ (в отдельных случаях, при добавлении щелочи в модуль по переработке суспензии, производительность модуля может быть выше предыдущего).

Конституция самой технологической линии налагает ограничения на объем выпускаемого комплексного удобрения V_M за цикл работы всего технологического оборудования в связи с наличием ограничений по загрузке отдельных модульных агрегатов технологической линии. Данный объем варьируется в пределах $0 < V_M < V_{M \max}$, где $V_{M \max}$ – максимальный объем производимых комплексных удобрений за цикл работы технологической линии. Также по требованиям заказчика может быть предусмотрена линия по выпуску ассортимента I комплексных удобрений за цикл работы технологической линии. Можно представить объем выпускаемого ассортимента комплексных удобрений как

$$V_M = \sum_{j=1}^I V_{Mj}, j = \overline{1, I},$$

где I – ассортимент комплексных удобрений.

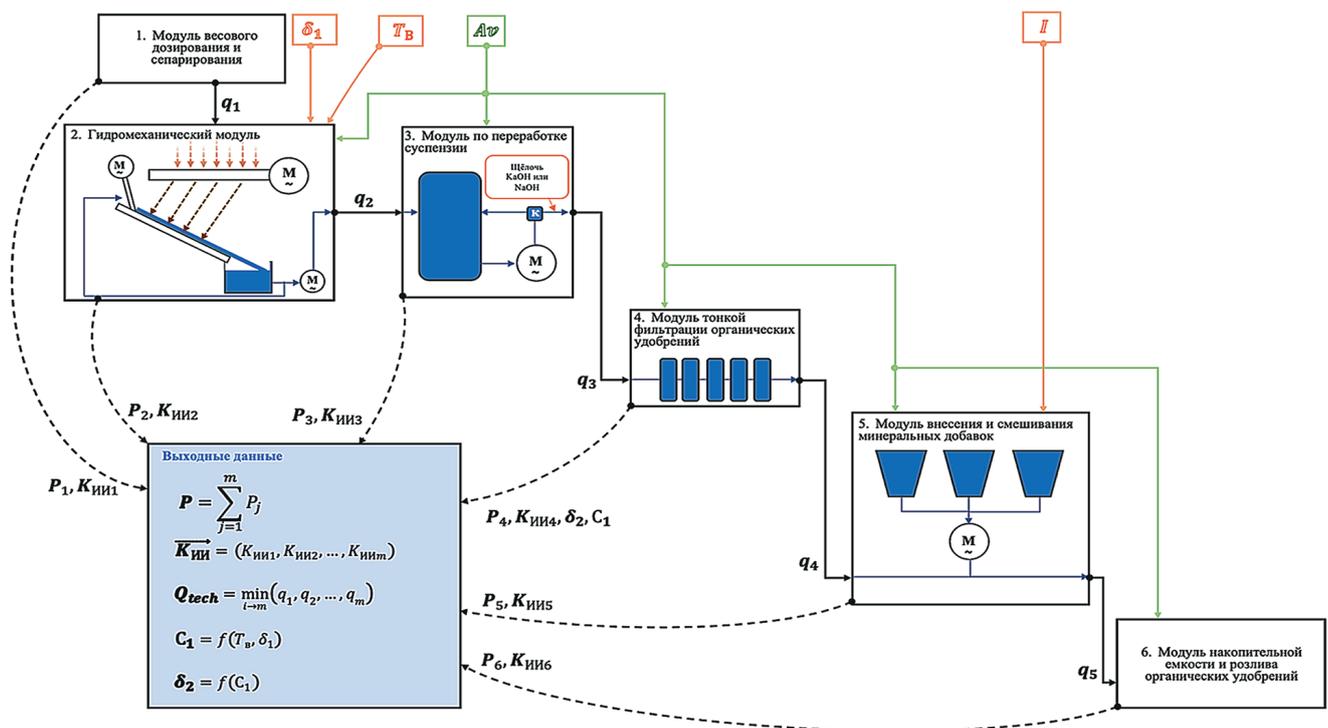


Рис. 2. Структурный вид математической модели технологического процесса на технологической линии

Fig. 2. Structural view of the mathematical model of the production line operation

Ассортимент комплексных удобрений достигается путем дозирования необходимых микроэлементов в соответствии с заказом покупателя. При этом производительность технологической линии не превышает $V_{M \max}$. Соответственно производительность технологической линии также составляет:

$$Q_{tech} = \frac{V_M}{T},$$

где T – время работы технологической линии, представляющее собой вектор-столбец $T = (t_1, t_2, \dots, t_m)$; t – время работы отдельного модуля.

Процесс производства комплекса удобрений, его интенсивность зависят от уровня автоматизации Av всей технологической линии. Допустим, уровень автоматизации характеризуется конечным множеством базисных технологических способов $Av = 1, 2, \dots, m$, каждому из которых соответствует интенсивность его использования y_k на базе модульных установок. Интенсивность работы модульного оборудования рассматриваемого технологического процесса можно представить одномерным вектором $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{Av})$, компоненты которого являются неотрицательными и характеризуют интенсивность использования соответствующей модульной установки. Для характеристики системы с технологической стороны следует указать также векторные функции [1]:

$$V_M(Y) = (V_{M1}(Y), \dots, V_{Mi}(Y));$$

$$r(Y) = (r_1(Y), \dots, r_m(Y)),$$

где $V_M(Y)$ – вектор объемов выпускаемых комплексных удобрений при поддержании технологического процесса на уровне интенсивности Y ; $r(Y)$ – вектор затрат ресурсов, необходимых для обеспечения соответствующего уровня автоматизации технологического процесса с интенсивностью Y . Тогда рассматриваемая система полностью характеризуется векторами $Y, V_M(Y), r(Y)$.

Пусть критерий эффективности системы определяется объемом выпускаемых комплексных удобрений и выражается соотношением [2]:

$$(\vec{W}, \vec{V}_M(\vec{Y})) = \sum_{i=1}^l W_i V_{Mi}(\vec{Y}), \quad (3)$$

где \vec{W} – вектор коэффициентов критерия эффективности. Тогда задача управления технологическим процессом заключается в отыскании уровня интенсивностей $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{Av})$, доставляющего экстремум функционалу (3):

$$\min_{\vec{Y}} \sum_{i=1}^l W_i V_{Mi}(\vec{Y}). \quad (4)$$

Зависимость уровня автоматизации технологического процесса Av от коэффициента искусственного интеллекта модульного оборудования $K_{ин}$ представляет собой функцию $Av = f(K_{ин})$. Зависимость дисперсности готового продукта δ_2 от концентрации гуминовых солей C_1 представляет собой функцию $\delta_2 = f(C_1)$. Концентрация гуминовых солей в комплексных удобрениях зависит от характеристик исходного сырья, используемого для приготовления удобрений – таких, как тип органического сырья T_b и дисперсность органического сырья δ_1 ,

и представляет собой зависимость $C_1 = f(T_b, \delta_1)$. Итоговая система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} P = \sum_{j=1}^m P_j, \\ K_{ин} = (K_{ин1}, K_{ин2}, \dots, K_{инm}), \\ Q_{tech} = \min_{i \rightarrow m} (q_1, q_2, \dots, q_m), \\ C_1 = f(T_b, \delta_1), \\ \delta_2 = f(C_1). \end{cases} \quad (5)$$

Полученная математическая модель представляет собой систему уравнений, при решении которой необходимо использовать общеизвестные численные методы (например, метод Ньютона). Для решения поставленной задачи целесообразно использовать программные обеспечения с модульным подходом – такие, как MatLab или MathCad. Данные программные обеспечения предназначены для выполнения инженерных и научных расчетов и высококачественной визуализации получаемых результатов. Эти системы применяются в математике, вычислительном эксперименте, имитационном моделировании.

Система (5) представляет собой перечень математических зависимостей, характеризующих влияние различных технологических параметров рассматриваемых модулей на производственный процесс. Данный математический подход при усовершенствовании самого математического аппарата (системы) позволит в дальнейшем обосновать оптимальную структуру линии производства органических удобрений исходя из индивидуальных требований каждого заказчика. Усовершенствование математического аппарата должно коснуться динамического описания самих гидромеханических и механических процессов, проходящих в рассматриваемых модулях. Описание гидромеханического процесса в гидромеханическом модуле представлено ниже.

Апробация системы уравнений (5). Моделирование работы технологической линии позволяет рассчитать дисперсность суспензии на различных этапах работы рассматриваемого технологического процесса производства комплексного удобрения. При моделировании в качестве единицы измерения геометрических размеров и массы частиц приняты соответственно микрометр и миллиграмм.

Рост дисперсности приводит к снижению массы частиц органического сырья (рис. 3).

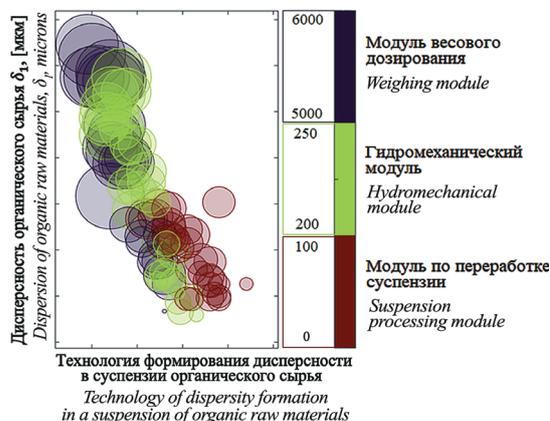


Рис. 3. Дисперсность органического сырья на этапах приготовления комплексного удобрения
Fig. 3. Dispersion of organic raw materials for various lines of complex fertilizer preparation

На рисунке 3 слева направо схематично представлены частицы органического сырья. На первом этапе в модуль весового дозирования поступает органическое сырье с дисперсностью 5000...6000 мкм, далее на гидромеханическом модуле дисперсность возрастает до 200...250 мкм, в модуле по переработке суспензии дисперсность достигает 0...100 мкм. Это обусловлено наличием гидромеханического модуля и модуля по переработке суспензии,

предназначенных для повышения дисперсности органического сырья. Данный эксперимент доказывает, что разработанная математическая модель хорошо согласуется с реальным технологическим производством и может быть использована для теоретических и инженерных расчетов. На рисунке 4 представлена зависимость дисперсности органического сырья δ_1 для четырех различных типов органического сырья.

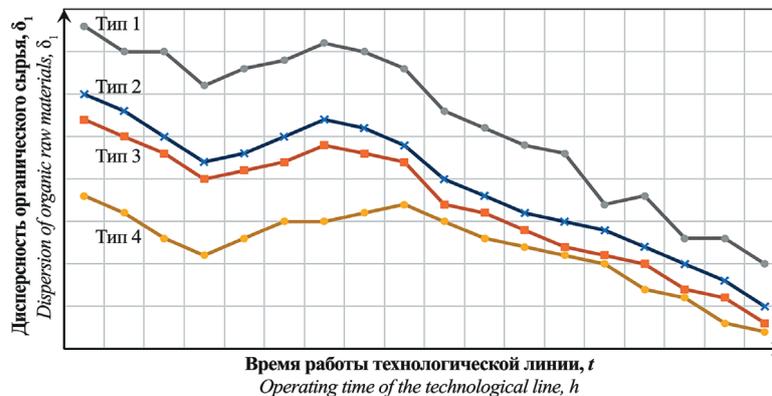


Рис. 4. Зависимость дисперсности органического сырья от времени работы технологической линии:

Тип 1 – торф; Тип 2 – бурый уголь; Тип 3 – сапропель; Тип 4 – биогумус

Fig. 4. Relationship between the dispersion of organic raw materials and the operating time of the technological line:

Type 1 – peat; Type 2 – brown coal; Type 3 – sapropel; Type 4 – biohumus

Из рисунка 4 следует, что дисперсность суспензии органического сырья увеличивается в течение работы технологической линии. Вышеуказанная закономерность сохраняется независимо от используемого типа органического сырья.

Разработанная математическая модель может быть использована для выбора параметров режимов востребованного технологического оборудования для сборки технологических линий по производству удобрений. Для этого были разработаны алгоритм и программа ЭВМ по выбору промышленных модулей для разработки новых

технологических линий на основе модульного оборудования и цифровых технологий. В основе программы ЭВМ лежит «База данных инновационного оборудования», формирование (обучение) которой производится за счет моделирования различных технологических процессов производства комплексных удобрений. На рисунке 5 представлена структурная схема обучения «Базы данных инновационного оборудования» программы ЭВМ математической моделью. Благодаря представленной программе ЭВМ оборудование выбирается с учетом его универсальности и модульности.

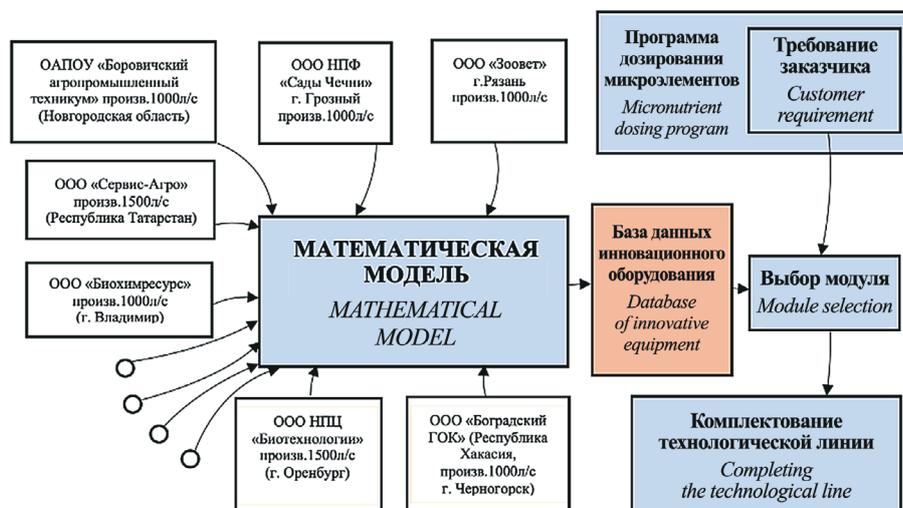


Рис. 5. Структурная схема обучения «Базы данных» программы ЭВМ математической моделью

Fig. 5. Structural diagram of training the computer “Database” software by the mathematical model

Инновационность представленного подхода заключается в том, что разработанная программа ЭВМ

на основе апробированной математической модели позволяет создавать новые или проводить модернизацию

старых производств комплексных удобрений с экономией денежных и временных ресурсов за счет использования модульного оборудования, предлагаемого на рынке машиностроительными предприятиями. Программа дозирования элементов не взаимосвязана с математической моделью и является полностью автономной системой.

Математическое описание гидромеханических процессов в гидромеханическом модуле. Для составления гидромеханических зависимостей движения потока теплой воды и суспензии органического сырья необходимо задаться местом взаимодействия этих исходных величин. При работе гидромеханического модуля и модуля переработки суспензии частички органического сырья и весь объем теплой воды находятся в постоянном движении за счет таких механизмов, как рассекатель, нагнетающий патрубок, смеситель, циркуляционный насос и дисмембратор. В потоке воды основной движущей силой является сдвигающая проекция силы тяжести. Ей противодействуют две силы, обуславливающие сопротивление потока со стороны самой жидкости (вязкость) и со стороны дна или поверхности трубопровода. Отметим, что вклад этих сил в скорость движения потока является различным.

Наибольший вклад в уменьшение скорости движения потока привносит сила, обусловленная неровностями поверхности и силами, возникающими со стороны архитектуры модульных устройств технологического процесса приготовления комплексных удобрений. В двух- и трехмерных гидродинамических моделях необходимо вводить функцию взаимодействия между вертикальными и горизонтальными слоями жидкости, что дает возможность учета обмена импульсами между слоями жидкости, создаваемыми, в том числе, смесителем в гидромеханической установке и дисмембратором в модуле переработки суспензии. Именно эти импульсы участвуют в разрушении целостности органического сырья, превращая его в суспензию. Выражение для силы трения между слоями движущейся жидкости может быть представлено в виде формулы Ньютона [3]:

$$F = \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, кг/(м·с); S – площадь соприкосновения слоев, м²; $\partial \vartheta / \partial h$ – градиент скорости, (м/с)/м.

При взаимодействии движущегося потока и поверхности возникает сила трения (или касательное напряжение, если силу трения отнести к площади взаимодействия). Для оценки касательных напряжений воспользуемся зависимостью Антуана Шези:

$$\tau = \rho g \frac{\vartheta^2}{C^2},$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ϑ – средняя скорость потока, м/с; C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Коэффициент Шези определяется многими факторами, поэтому существуют несколько сотен эмпирических формул расчета коэффициента Шези и множество способов оценки шероховатости поверхностей, входящей в формулу расчета этого коэффициента. Однако исследователи отмечают, что в целом течение воды на поверхности не влияет на сопротивление движения воды в условиях гладких

поверхностей. Сопротивление формы в открытых потоках может быть описано посредством формулы Буссинеска [4, 5]:

$$I_f = -\beta \frac{\partial \vartheta^2}{2g \partial l},$$

где I_f – отнесенная к единице веса жидкости фиктивная сила добавочного сопротивления расширяющихся водоводов, (кг·м/с²)/кг; β – коэффициент добавочного сопротивления расширяющихся объемных потоков, м/с²; ϑ – средняя скорость в поперечном сечении, м/с; l – продольная координата, м, причем $\beta > 0$ при $(\partial \vartheta^2 / \partial l) < 0$ и $\beta = 0$ при $(\partial \vartheta^2 / \partial l) \geq 0$.

Математическое представление гидравлического сопротивления в гидродинамических моделях, как правило, сводится к коэффициенту трения между подстилающей поверхностью (в нашем случае – покров органического сырья, расстилающийся на емкости подготовки органического сырья) и потоком. Это представление, с одной стороны, удобно тем, что в одном члене уравнения, в одном множителе сведена вся информация о взаимодействии всех неровностей и потока. С другой стороны, очевидно, что эта связь является многофакторной и нелинейной, поэтому сводить ее описание в один коэффициент трения представляется некорректным. Одним из вариантов описания взаимодействия потока и неровностей покрова органического сырья на дне емкости подготовки органического сырья может быть сравнительно детализированное представление механики этого процесса. При этом важно принимать во внимание, что:

- процесс следует рассматривать в рамках принятого пространственно-временного масштаба;
- количественную оценку силы сопротивления дна емкости подготовки органического сырья потоку можно получить непосредственно из физико-механических свойств загружаемого органического сырья.

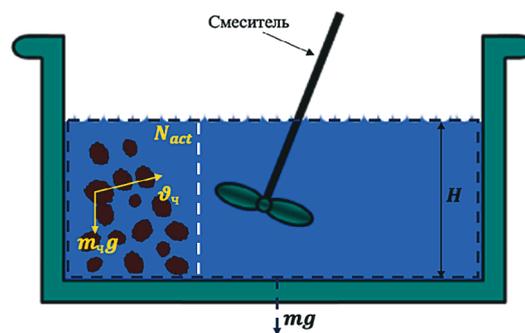


Рис. 6. Графическое представление емкости подготовки органического сырья гидромеханического модуля

Fig. 6. Graphical view of the tank for organic raw materials of the hydromechanical module

Такой подход проиллюстрирован в математической модели движения воды и твердого вещества [6-8]. Основное уравнение модели получено на основании баланса сил, действующих в потоке. Параметры модели – угол внутреннего трения и сила сцепления частиц органического сырья между собой – определяются физико-механическими свойствами покрова, а величины этих параметров представлены в строго определенных диапазонах.

Основное уравнение математической модели движения воды и частиц органического сырья в потоке имеет вид [6, 7, 9] (рис. 6):

$$(1 - f) \left(mg \left[I - \frac{\partial H}{\partial L} \right] \right) - N_{act} m_{ch} \frac{d\vartheta_{ch}}{dt} + N_{act} m_{ch} g - cS = 0, \quad (6)$$

где f – коэффициент внутреннего трения; m – масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами емкости подготовки органического сырья, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; I – уклон поверхности; H – глубина потока, м; L – расстояние, м; ϑ – средняя скорость потока, м/с; t – время, с; N_{act} – количество перемещаемых частиц в потоке; m_{ch} – масса частицы, кг; ϑ_{ch} – скорость движения частицы, м/с; c – сцепление частиц органического сырья при сдвиге, кг/(м · с²); S – площадь приложения силы, м².

Уравнение движения воды и частиц органического сырья замыкается уравнениями неразрывности потока, равнодействующей скорости движения частиц и баланса кинетической энергии потока воды и твердого вещества. В рассматриваемой модели все процессы считаются как квазистационарные, при которых во всех точках объема полости одинаковые параметры (давление, температура и плотность). На рисунке 7 представлено распределение скоростей согласно принадлежности слоев к потоку.

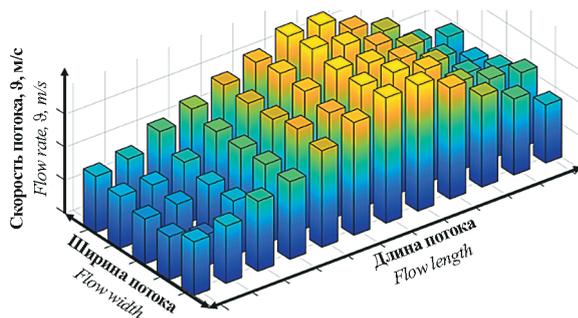


Рис. 7. Распределение скорости движения потока воды

Fig. 7. Distribution of the water flow speed

Из рисунка 7 следует, что поток, который находится ближе к стенкам емкости подготовки органического сырья, имеет наименьшую скорость, нежели поток воды, который удален от нее. Для упрощения задачи пренебрегаем теплообменом с окружающей средой. Традиционной системой дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости, является система на базе уравнений Навье-Стокса. В рамках рассматриваемой модели система уравнений состоит из уравнения движения и уравнения неразрывности.

В векторном виде они записываются следующим образом [10]:

$$\frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t} = -(\vec{\vartheta} \cdot \nabla) \vec{\vartheta} + \varepsilon \cdot \vec{\vartheta} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

где ∇ – оператор набла; Δ – векторный оператор Лапласа; t – время; ε – коэффициент кинематической вязкости; ρ – плотность; p – давление; $\vec{\vartheta} = (\vartheta_1, \dots, \vartheta_n)$ – векторное поле скорости; \vec{f} – векторное поле массовых

сил. Неизвестные p и $\vec{\vartheta}$ являются функциями времени t и координаты $x \in \Omega$, где $\Omega \in R^n$, $n = 2$ или 3 – плоская или трехмерная область, в которой движется жидкость. С учетом того, что поток жидкости сообщен с атмосферой, следует систему уравнений дополнить уравнением несжимаемости:

$$\nabla \cdot \vec{\vartheta} = 0.$$

Баланс сил в потоке расписывается следующим образом:

$$F_{тн} - F_c - F_b = 0,$$

где $F_{тн}$ – сдвигающая проекция силы тяжести потока, Н; F_c – сила сопротивления частиц органического сырья сдвигу, Н; F_b – сила вязкости, Н.

Уравнение (6) примет вид:

$$(1 - f) mgI - cS - \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h} = 0. \quad (7)$$

С учетом вышесказанного система уравнений, описывающая процесс движения потока воды в емкости подготовки органического сырья и взаимодействия с твердыми частицами органического сырья, примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h}, \\ \tau = \rho g \frac{\vartheta^2}{C^2}, \\ I_f = -\beta \frac{\partial \vartheta^2}{2g \partial l}, \left\{ \begin{array}{l} \beta > 0 \text{ при } \frac{\partial \vartheta^2}{\partial l} < 0, \\ \beta = 0 \text{ при } \frac{\partial \vartheta^2}{\partial l} \leq 0, \end{array} \right. \\ (1 - f) mgI - cS - \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h} = 0, \\ \frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t} = -(\vec{\vartheta} \cdot \nabla) \vec{\vartheta} + \varepsilon \cdot \vec{\vartheta} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \text{ при } \nabla \cdot \vec{\vartheta} = 0, \\ F_{тн} - F_c - F_b = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Система (8) представляет собой набор зависимостей и уравнений на базе формул Ньютона, Антуана Шези, Буссинеска, Навье-Стокса и законов гидромеханики, которые в совокупности представляют собой систему, описывающую механику движения потока воды и ее взаимодействие с твердыми частицами органического сырья в гидромеханическом очистителе и реакторе.

Выводы

1. С помощью представленной математической модели, описывающей гидромеханические и механические процессы, можно математически описать реальный объект и воспользоваться для анализа его свойств математическим аппаратом, не зависящим от конкретной природы данного объекта. Модель может быть использована при рассмотрении формирования суспензии с необходимой дисперсностью в гидромеханическом очистителе и реакторе.

2. Представленная математическая модель, основанная на некотором упрощении, хорошо согласуется с реальным технологическим производством и может быть использована для теоретических и инженерных расчетов.

3. Совершенствование математической модели процесса работы технологической линии по переработке органического сырья с применением теории искусственных нейронных сетей может в дальнейшем использоваться в системе автоматизации технологических

операций и мониторинга показателей качества работы модульного оборудования, при переработке органического сырья, что обеспечит новый уровень синтеза сложных технических систем в интересах сельскохозяйственного производства.

Библиографический список

1. Dym C.L. Engineering Design: A Synthesis of Views. 1st Edition, Cambridge University Press, New York, 1994.
2. Алпатов Ю.Н. Моделирование процессов и систем управления: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 140 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://e.lanbook.com/book/106730>.
3. Дмитриевский В.И. Гидромеханика. М.: Морской транспорт, 1962. 296 с.
4. Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 184 с.
5. Петров А.В. Моделирование процессов и систем: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2015. 288 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/68472>.
6. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.
7. Шмакова М.В. Расчет заносимости русловых карьеров // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. № 26. С. 71-75.
8. Эрозионные процессы / Под ред. Н.И. Маккавеева и Р.С. Чалова. М.: Мысль, 1984. 256 с.
9. Горлач Б.А., Шахов В.Г. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация. СПб.: Лань, 2022. 292 с.
10. Cha P.D., Rosenberg J.J., Dym C.L. Fundamentals of Modeling and Analyzing Engineering Systems. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 466 pp.

Критерии авторства

Сорокин К.Н. выполнил теоретические исследования, на основании полученных результатов провел обобщение и подготовил рукопись. Сорокин К.Н. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.03.2022

Одобрена после рецензирования 10.03.2022

Принята к публикации 05.04.2022

References

1. Dym C.L. Engineering Design: A Synthesis of Views. 1st Edition, Cambridge University Press, New York, 1994.
2. Alpatov Yu.N. Modelirovanie protsessov i sistem upravleniya [Modeling of processes and control systems]. St. Petersburg, Lan', 2018. 140 p. [Electronic resource]: URL: <https://e.lanbook.com/book/106730>. (In Rus.)
3. Dmitrievskiy V.I. Gidromekhanika [Hydromechanics]. Moscow, Morskoy transport, 1962. 296 p. (In Rus.)
4. Grishanin K.V. Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel [Hydraulic resistance of natural channels]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992. 184 p. (In Rus.)
5. Petrov A.V. Modelirovanie protsessov i sistem [Modeling of processes and systems]: Study guide. St. Petersburg: Lan', 2015. 288 p. [Electronic resource]. URL: <https://e.lanbook.com/book/68472>. (In Rus.)
6. Shmakova M.V. Teoriya i praktika matematicheskogo modelirovaniya rechnykh potokov [Theory and practice of the mathematical modeling of river flows]. St. Petersburg, Lema, 2013. 142 p. (In Rus.)
7. Shmakova M.V. Raschet zanosimosti ruslovykh kar'yeroov [Drift calculation in open channel pits]. *Uchenye zapiski Rossiiskoi gosudarstvennogo meteorologicheskogo universiteta*, 2012; 26: 71-75. (In Rus.)
8. Eroziionnye protsessy [Erosion processes]. Ed. by N.I. Makkaveeva and R.S. Chalov. Moscow, Mysl', 1984. 256 p. (In Rus.)
9. Gorlach B.A., Shakhov V.G. Matematicheskoe modelirovanie. Postroyenie modeley i chislennaya realizatsiya [Mathematical modeling. Construction of models and their numerical implementation]. St. Petersburg, Lan', 2022. 292 p. (In Rus.)
10. Cha P.D., Rosenberg J.J., Dym C.L. Fundamentals of Modeling and Analyzing Engineering Systems. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 466 p.

Contribution

K.N. Sorokin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. K.N. Sorokin has author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 01.03.2022

Approved after reviewing 10.03.2022

Accepted for publication 05.04.2022