

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНАЭРОБНОГО ФИЛЬТРА

## THEORETICAL BASIS AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF ANAEROBIC FILTER

**Ключевые слова:** анаэробное сбраживание, анаэробный фильтр, биогаз, циклические возмущения, модель, планирование эксперимента, демонстрационная установка, параметр, фактор, эксперимент, регрессионные уравнения.

Для переработки жидкого навоза, в особенности животноводческих стоков, применяют метантенки с фиксированной биомассой – анаэробные фильтры. Приводится теоретическое исследование фазы опорожнения анаэробного фильтра для сбраживания животноводческих стоков. В данной фазе работы происходят циклические возмущения: изменение скорости движения субстрата в фильтре, обновление граничных поверхностей, лавинообразное выделение биогаза, разрушение пенного слоя. Составлена гидравлическая модель анаэробного фильтра в фазе опорожнения, найдена функциональная зависимость скорости движения свободной поверхности стоков в фильтре. В результате проведенного теоретического исследования выявлены основные воздействующие факторы процесса анаэробного сбраживания. С целью визуального и приборного наблюдения циклических возмущений, ранжирования воздействующих факторов проведено экспериментальное исследование на демонстрационной моделирующей установке. Она позволяет смоделировать процесс работы анаэробного фильтра с циклическим возмущением, с имитацией выделения биогаза. В качестве субстрата применялась вода, а биогаза – атмосферный воздух. Исследования проведены в соответствии с требованиями планирования многофакторного эксперимента, описана методика проведения опытов. Результаты эксперимента обработаны с помощью программы STATISTICA 6.0, получены регрессионные уравнения оценочных параметров. На основании полученных результатов экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы: разработанная гидравлическая модель работы анаэробного фильтра с циклическим возмущением подтвердилась экспериментальными исследованиями на демонстрационной установке; в соответствии с гидравлической моделью скорость движения свободной поверхности стоков в фильтре зависит от физико-химических характеристик субстрата и технологических параметров

анаэробного сбраживания ( $D_s; T; W; K$ ), а также конструктивных особенностей установки ( $l_{\phi}; d_{\phi}; d_{\phi i}; l_{c i}; d_{c i}; \sum \zeta_{c i}; H$ ).

**Keywords:** anaerobic digestion, anaerobic filter, biogas, cyclic perturbation, model, plan of experiment, a demonstration plant, parameter, factor, experiment, regression equations.

For processing liquid manure, and especially, livestock wastewater digesters are used with fixed biomass - anaerobic filters. The article provides a theoretical study of emptying phase of the anaerobic filter for livestock waste water digestion. In this phase the cyclic disturbances occur: produces a change in speed of the substrate in the filter, the updating of boundary surfaces, avalanche allocation of biogas, and destruction of the foam layer. Hydraulic model of anaerobic filter is composed in emptying phase, functional dependence of motion speed of effluent free surface in the filter is found. As a result of the conducted theoretical study, the main factors affecting the process of anaerobic digestion are revealed. For the purpose of visual and instrumental observations of cyclical disturbances, the ranking of influencing factors, experimental study has been made on the modeling demonstration plant. It enables to simulate the operational process of anaerobic filter with siphon drainage, with simulation of biogas release. As a substrate the water was used and as a biogas - ambient air. The studies have been conducted in accordance with the requirements of planning multifactorial experiment, also the methodology of the experimental process are described. The experimental results are processed with STATISTICA 6.0 program; regression equations of evaluation parameters have been obtained. Basing on the achieved results of experimental studies the following conclusions are made: Elaborated hydraulic model of the anaerobic filter operation has been confirmed by experimental studies on the demonstration plant. - According to the hydraulic model, the velocity of free surface movement of the effluents in the filter depends on physical and chemical characteristics of the substrate and technological parameters of anaerobic digestion ( $D_s; T; W; Ch$ ), as well as the constructive features of the plant ( $l_f; d_p; d_f; l_s; d_s; \sum \xi_s; P$ ).

**Васильева Аяна Сергеевна**, аспирант, каф. технического обеспечения АПК, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: fvasiljev@yandex.ru.

**Евтеев Виктор Константинович**, к.т.н., доцент, в.н.с., каф. технического обеспечения АПК, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: fvasiljev@yandex.ru.

**Vasilyeva Ayana Sergeyevna**, Post-Graduate Student, Chair of Technical Support of Agriculture, Irkutsk State Agricultural Academy. E-mail: fvasiljev@yandex.ru.

**Yevteyev Viktor Konstantinovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Leading Staff Scientist, Chair of Technical Support of Agriculture, Irkutsk State Agricultural Academy. E-mail: fvasiljev@yandex.ru.

**Введение**

В сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири существует проблема переработки навоза и навозных стоков свиноводческих ферм и комплексов. В условиях промышленного свиноводства нашли широкое применение бесподстилочное содержание животных, гидравлические и механические системы удаления навоза из животноводческих помещений. В ветеринарно-санитарном отношении наиболее приемлемы гидравлические системы удаления навоза из свиноводческих помещений. Применение данной системы удаления навоза имеет ряд преимуществ, но при его использовании, а также за счет сброса воды, используемой для технологических целей, получают жидкий навоз и навозные стоки влажностью до 98%, следовательно, возникают дополнительные трудности при переработке больших масс свиного навоза и стоков.

С точки зрения ресурсосбережения наиболее перспективным и рациональным является применение технологии анаэробной переработки жидкого свиного навоза. Применение данной технологии позволяет снизить затраты энергии на переработку и дальнейшую утилизацию без вреда для окружающей среды и получить в виде альтернативного энергоносителя – биогаза [1-3].

**Целью исследования** являются получение гидравлической модели для определения зависимости величины гидродинамических возмущений от параметров работы анаэробного фильтра и её экспериментальная проверка.

**Объект исследования** – процесс работы анаэробного фильтра с циклическим возмущением в фазе опорожнения.

**Теоретические исследования**

В фазе опорожнения работы анаэробного фильтра происходят циклические возмущения: изменение скорости движения субстрата в фильтре, обновление граничных поверхностей, лавинообразное выделение биогаза, разрушение пенного слоя (рис.) [4].

Для оценки возмущений в данной фазе принимается следующий параметр – скорость движения свободной поверхности стоков в фильтре ( $v_\phi$ ), которую можно определить, составив уравнение баланса объемного расхода. Допустим, что уровень жидкости в фильтре и баке в данный момент времени находятся, соответственно, на высоте  $Z_1$  и  $Z_2$ . За бесконечно малый промежуток времени опорожнения  $dt_{он}$  уровень в фильтре изменится на  $dZ_1$ , а в сифоне – на  $dZ_2$ , течение жидкости можно считать установившимся. За это время из сифона вытечет объем жидкости  $Q_c dt_{он}$ , в то же время в бак из фильтра притечет объем жидкости  $Q_{пр} dt_{он}$ . В свою

очередь в фильтр поступает объем жидкости  $Q_{под} dt_{он}$ , в то же время из фильтра вытекает объем жидкости  $Q_{выт} dt_{он}$ . Тогда объем жидкости в баке сифонного отвода изменится на величину  $dW_\phi$ , а изменение объема жидкости в фильтре составит  $dW_\phi$ .

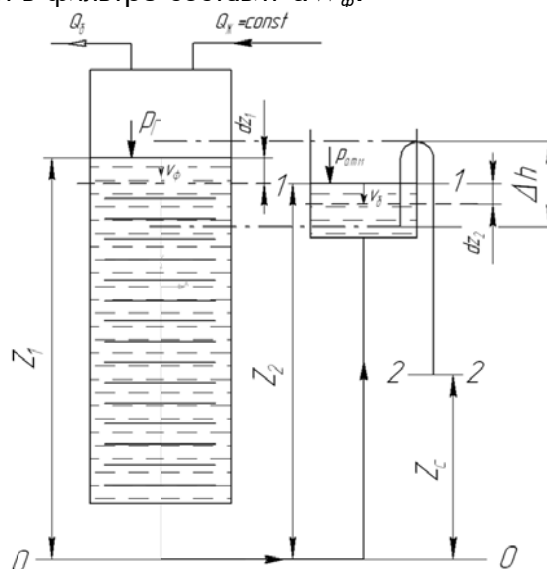


Рис. 1. Анаэробный фильтр

Баланс объемов данной системы представится в виде двух уравнений:

$$dW_\phi = Q_c dt_{он} - Q_{пр} dt_{он}; \tag{1}$$

$$dW_\phi = Q_{выт} dt_{он} - Q_{под} dt_{он}.$$

В приведенной системе уравнений очевидным является то, что объем притекающий из фильтра в бак  $Q_{пр} dt_{он}$  и объем вытекающей из фильтра в бак  $Q_{выт} dt_{он}$  равны. Таким образом, можно приравнять уравнения системы, и изменение объема бака сифона будет выглядеть следующим образом:

$$dW_\phi = \omega_\phi dZ_2, \tag{2}$$

где  $\omega_\phi$  – площадь живого сечения бака сифона,  $m^2$ .

Изменение объема фильтра:

$$dW_\phi = \omega_\phi dZ_1, \tag{3}$$

где  $\omega_\phi$  – площадь живого сечения фильтра,  $m^2$ .

Подставив уравнения (2) и (3) к приравненному уравнению (1) и решая, его относительно изменения высоты  $dZ_1$ , получим:

$$dZ_1 = \frac{Q_c dt_{он} - Q_{под} dt_{он} - \omega_\phi dZ_2}{\omega_\phi}. \tag{4}$$

Скорость движения свободной поверхности в фильтре  $v_\phi$  определим, поделив уравнение (4) на время опорожнения  $dt_{он}$ :

$$dv_\phi = \frac{dZ_1}{dt_{он}} = \frac{dQ_c - Q_{под} - \omega_\phi dv_\phi}{\omega_\phi}, \tag{5}$$

где  $dv_{\phi} = \frac{dZ_2}{dt_{он}}$  – скорость движения свободной поверхности стоков в баке сифона, м/с.

Если рассматривать весь период опорожнения, то движение жидкости является неустановившимся, поэтому мы в уравнении (5) указали на изменение расхода сифонного отвода:

$$dQ_c = \omega_c dv_c, \quad (6)$$

где  $\omega_c$  – площадь живого сечения сифонного трубопровода, м<sup>2</sup>;

$dv_c$  – скорость движения в сифонном трубопроводе, м/с.

Уравнение (5) в функциональном виде запишется как:

$$dv_{\phi} = f(dQ_c; Q_{нод}; \omega_{\phi}; dv_{\phi}; \omega_{\phi}) = f(dQ_c; D_3; l_{\phi}; d_{\phi}; d_{\phi}), \quad (7)$$

где  $D_3$  – доза загрузки, %;

$l_{\phi}$  – длина рабочей части фильтра, м;

$d_{\phi}$  – диаметр бака сифона, м;

$d_{\phi}$  – диаметр фильтра, м.

Для определения расхода сифона воспользуемся уравнением Бернулли, уравнением неразрывности [5]. Принимаем сечение 1-1, совпадающее со свободной поверхностью жидкости в баке сифона, а сечение 2-2 – совпадающее с концом сифонного трубопровода (рис. 3), тогда

$$v_1 = v_{\phi}; v_2 = v_c; p_1 = p_{атм}; p_2 = p_{атм};$$

$$Z_1 = Z_2; Z_2 = Z_c; \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0 = \alpha_1.$$

Окончательный вид уравнения расхода сифона примет вид:

$$Q_c = \sqrt{\frac{1}{1 + \lambda \frac{l_c}{d_c} + \sum \xi_c}} * \omega_c * \quad (8)$$

$$* \left[ v_{\phi} + \sqrt{2gH} - \sqrt{2l_c \frac{dv_c}{dt}} \right],$$

где  $H = Z_2 - Z_c$  – напор сифона, м;

$$\sqrt{2l_c \frac{dv_c}{dt}} = \sqrt{2 \int_{S_2}^{S_1} \frac{\partial v}{\partial t} dS} \quad \text{– инерционная}$$

скорость, где не учтены изменения при движении жидкости в баке сифона (ввиду их незначительности) и принято, что сечение сифонного трубопровода постоянно по длине и является цилиндрическим [5].

В функциональном виде формула (8) опеределяется как:

$$Q_c = f \left[ \lambda; l_c; d_c; \sum \xi_c; v_{\phi}; H; \frac{dv_c}{dt} \right] = f \left[ T; W; K; l_c; d_c; \sum \xi_c; d_{\phi}; H; \frac{dv_c}{dt} \right], \quad (9)$$

где  $T$  – температура стоков, °С;

$W$  – влажность стоков, %;

$K$  – химический состав стоков.

Из анализа уравнений (8) и (9) определим функциональную зависимость скорости движения свободной поверхности стоков в фильтре:

$$v_{\phi} = f \left[ D_3; l_{\phi}; d_{\phi}; d_{\phi}; T; W; K; l_c; d_c; \sum \xi_c; H; \frac{dv_c}{dt} \right]. \quad (10)$$

Для подтверждения полученных теоретических разработок были проведены экспериментальные исследования на демонстрационной установке.

### Методика проведения

#### экспериментальных исследований

Исследования проводились в два этапа:

1) проведение экспериментов на демонстрационной установке;

2) математическая обработка результатов экспериментов.

С целью изучения и наблюдения возмущающего воздействия, поиска конструктивных и технологических факторов, оказывающих влияние на величину гидродинамических возмущений, был проведен эксперимент на демонстрационной установке, которая является аналогом анаэробного фильтра с циклическим возмущением. Она позволяет смоделировать процесс работы фильтра, с имитацией выделения биогаза. В качестве субстрата применялась вода, а биогаза – атмосферный воздух. Планирование эксперимента разработано в соответствии с методикой Ю.П. Адлера [6].

В связи с поставленной целью были определены измеряемые параметры:  $t_{он}$  – время фазы опорожнения, с;  $t_{зан}$  – время фазы заполнения, с;  $\Delta p$  – изменение давления на свободную поверхность, Па;  $\Delta h_{св.пов}$  – изменение высоты свободной поверхности жидкости в фильтре, 10<sup>-3</sup> м.

Оценочные параметры, определяющие величину и характер циклических возмущений, следующие:  $\Delta p(Y_1)$  – изменение давления в газовом объеме фильтра, Па;  $V(Y_2)$  – скорость движения свободной поверхности жидкости, м/с;  $t_{цикла}(Y_3)$  – продолжительность цикла возмущения в анаэробном фильтре, с;  $n(Y_4)$  – частота протекания циклов, циклов/сут.

В результате проведения теоретических исследований [4], изучения априорной информации принято варьировать следующими факторами:  $h_3(X_1)$  – высота погружения трубки в гидравлическом затворе, 10<sup>-3</sup>·м;  $\Delta h(X_2)$  – уровень колебания жидкости в баке

сифона, 10<sup>-3</sup>·м;  $\frac{\omega_{\phi}}{\omega_{б.с.}}$  ( $X_3$ ) – отношение пло-

щади сечения фильтра к площади сечения бака сифона;  $Q_{ж} (X_4)$  – подача жидкости в анаэробный фильтр,  $10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $h_c (X_5)$  – напор сифона,  $10^{-3} \text{ м}$ .

Исследования проводились на двух уровнях – максимальном (+1) и минимальном (-1) с использованием дробного факторного эксперимента  $2^{5-2}$ . Составлена матрица планирования эксперимента из восьми опытов, в натуральных и кодированных величинах, опыты рандомизированы во времени с помощью таблицы случайных чисел [6, 7].

В соответствии с составленным планированием и методикой проведения эксперимента была сооружена опытная установка, которая позволила провести визуальное наблюдение процесса опорожнения бака сифона с имитацией подачи субстрата и выделения биогаза [7].

### Результаты

#### экспериментальных исследований

В результате выполнения эксперимента в соответствии с матрицей планирования получены следующие результаты:

- изменение давления в газовом объеме фильтра, Па:

$$Y_1 = -0,034 + (-0,087X_1) + 0,829X_2 + (-0,30X_3) + 0,011X_4 + (0,030X_5);$$

- скорость движения свободной поверхности жидкости в фильтре, м/с:

$$Y_2 = -0,020 + (-0,005X_1) + (-0,063X_2) + (-0,74X_3) + (-0,042X_4) + 0,026X_5;$$

- продолжительность цикла возмущения в анаэробном фильтре, с:

$$Y_3 = -0,158 + (-0,091X_1) + 0,094X_2 + 0,722X_3 + (-0,11X_4) + (-0,070X_5);$$

- частота протекания циклов, циклов/сут.:

$$Y_4 = -0,279 + 0,001X_1 + (-0,155X_2) + (-0,656X_3) + 0,165X_4 + 0,023X_5.$$

Из полученных регрессионных уравнений следует, что наибольшее влияние на параметры оказывают факторы  $X_2$  и  $X_3$ , соответственно, уровень жидкости в баке сифона и отношение площади сечения фильтра и площади сечения бака сифона.

Проверка значимости коэффициентов выполнялась с помощью критерия Стьюдента, значимость коэффициентов подтвердилась.

Проверку адекватности полученных уравнений выполняли с помощью критерия Фишера, по результатам модели признаны адекватными.

### Выводы

1. Разработанная гидравлическая модель работы анаэробного фильтра с циклическим возмущением подтвердилась экспериментальными исследованиями на демонстрационной установке.

2. В соответствии с гидравлической моделью скорость движения свободной поверхности стоков в фильтре зависит от физико-химических характеристик субстрата и техно-

логических параметров анаэробного сбразживания ( $D_з; T; W; K$ ), а также конструктивных особенностей установки ( $l_{фi}; d_{бi}; d_{фi}; l_{ci}; d_{ci}; \Sigma \zeta_{ci}; H$ ). Наиболее технологичными факторами для управления скоростью являются  $D_з; d_{бi}; d_{фi}; d_{ci}; H$ . Причем увеличение  $d_{ci}; H$  будет способствовать повышению скорости, а увеличение  $D_з; d_{бi}; d_{ф}$  – снижать её.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании конструкций анаэробных фильтров.

### Библиографический список

1. Калюжный С.В., Пузанков А.Е., Варфоломеев С.Д. Биогаз: проблемы и решения. Биотехнология (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). – М., 1988. – Т. 21. – 180 с.
2. Ильин С.Н. Ресурсосберегающая технология переработки свиного навоза с получением биогаза: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01. – Улан-Удэ, 2005. – 23 с.
3. Deublein D., Steinhäuser A. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. – 450 p.
4. Евтеев В.К., Васильева А.С. Анаэробный фильтр с циклическим возмущением // Природопользование и аграрное производство: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (23-25 мая 2012 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2012. – С. 26.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – 5-е изд. – М.: ООО «БАСТЕТ», 2008. – 600 с.
6. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
7. Васильева А.С., Евтеев В.К. Результаты экспериментальных исследований на демонстрационной установке анаэробного фильтра // Экологическая безопасность и перспективы развития аграрного производства Евразии: матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию аспирантуры ИрГСХА (3-5 декабря 2013 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2013. – С. 12.

### References

1. Kalyuzhnyi S.V., Puzankov A.E., Varfolomeev S.D. Biogas: problem i resheniya. Biotekhnologiya (Itogi nauki i tekhniki VINITI AN SSSR). – M., 1988. – T. 21. – 180 s.
2. Il'in S.N. Resursosberegayushchaya tekhnologiya pererabotki svinogo navozaz s polucheniem biogaza: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01. – Ulan-Ude, 2005. – 23 s.
3. Deublein D., Steinhäuser A. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. – 450 p.

4. Evteev V.K., Vasil'eva A.S. Anaerobnyi fil'tr s tsiklicheskim vozmushcheniem // Prirodopol'zovanie i agrarnoe proizvodstvo: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (23-25 maya 2012 g.). – Irkutsk: IrGSKhA, 2012. – S. 26.

5. Chugaev R.R. Gidravlika. – 5-e izd. – M.: OOO «BASTET», 2008. – 600 s.

6. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii. – 2-e izd., pe-rerab. i dop. – M.: Nauka, 1976. – 280 s.

7. Vasil'eva A.S., Evteev V.K. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy na demonstratsionnoi ustanovke anaerobnogo fil'tra // Ekologicheskaya bezopasnost' i perspektivy razvitiya agrarnogo proizvodstva Evrazii: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 60-letiyu aspirantury IrGSKhA (3-5 dekabrya 2013 g.). – Irkutsk: IrGSKhA, 2013. – S. 12.



УДК 658.511:66.011

И.Ю. Шевченко  
I.Yu. Shevchenko

**УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМ НЕФТЕХИМИЧЕСКИМ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ  
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**THE CONTROL OF COMPLEX PETROCHEMICAL PRODUCTION BASED  
ON MATHEMATICAL MODELING  
AND MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES**

**Ключевые слова:** оптимальное управление, информационные технологии, экономико-математическое и компьютерное моделирование, информационно-моделирующая система, детерминированные модели, промышленное производство, пиролиз углеводородов, производственные задачи, оптимизация, модернизация.

Развитие современных производственных технологий связано с внедрением безотходных технологических циклов в составе производства как экологически и экономически выгодных. Моделирование и информационные технологии позволяют проводить вычислительные эксперименты с целью анализа возможных ситуаций при изменении параметров ведения процесса. Оптимальное управление промышленным производством происходит на базе современных информационно-моделирующих систем (ИМС), разработанных с помощью методов математического моделирования и искусственного интеллекта. Представлена компьютерная информационно-моделирующая система основного узла процесса пиролиза углеводородов, основанная на детерминированных математических моделях пиролизных трубчатых печей со змеевиками разной конструкции, в виде реакторов идеального вытеснения. Печи промышленного блока работают параллельно на различном углеводородном сырье. Одна из основных технологических проблем для печей пиролиза – это универсальность по отношению к сырью. Разработанная ИМС процесса пиролиза углеводородов базируется на математических моделях, чувствительных к изменению химического состава сырья, так как они учитывают механизм химических реакций, физико-химические закономерности протекающих явлений (кинетику процесса) и

покомпонентный состав сырья и продуктов, а также технологические параметры процесса и конструктивные особенности печей. С помощью данной ИМС проведены серии прогноз-расчетов по целевым продуктам для пиролизного производства (завода «Этилен») Томского нефтехимического комбината на сырье Омского и других нефтеперерабатывающих заводов, также просчитывались варианты пиролиза широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ) как в качестве самостоятельного сырья, так и в качестве добавки к прямогонному бензину. Предлагаемая информационно-моделирующая система процесса пиролиза различного углеводородного сырья позволяет решать реальные производственные задачи по компоновке сырья, модернизации технологического оборудования и другие связанные с оптимальным управлением производства и уменьшением аварийных ситуаций.

**Keywords:** optimal control, information technology, economic-mathematical modeling and computer simulation, information-modeling system-mA, deterministic models, industrial production, pyrolysis of hydrocarbons, production problems, optimization, modernization.

Modeling and information technologies allow to carry out the computational experiments to analyse possible situations when changing the parameters of process. Optimal control of industrial production is based on modern information-modeling systems (IMS), developed using the methods of mathematical modeling and artificial intelligence. This work presents computer information-modeling system of the pyrolysis of hydrocarbons primary node, based on deterministic mathematical models of pyrolysis tube furnaces with coils of different constructions, in