


Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Агрофизический научно-исследовательский институт»  
Российский фонд фундаментальных исследований



## **МАТЕРИАЛЫ**

**Международной научной конференции,  
посвященной 85-летию Агрофизического НИИ  
«ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АГРОФИЗИКИ:  
ОТ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И  
РАСТЕНИЕВОДСТВА К ТЕХНОЛОГИЯМ БУДУЩЕГО»**

**Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2017 г.**

Санкт-Петербург  
2017

УДК 528.(076.5):631.5+633/635: 631.43

ББК .12:41.4+41: 40.1

Т33

**Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего».** Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2017 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2017. – 837 с.

Международная научная конференция «Тенденции развития агрофизики: от современных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» посвящена 85-летию Агрофизического научно-исследовательского института.

Результаты научных исследований, представленные на конференции, связаны с решением целого ряда фундаментальных проблем: 1. Выявление взаимосвязей и изучение функционирования почвенно – растительных комплексов и агроэкосистем в условиях техногенного воздействия, глобальных и региональных климатических изменений; 2. Применение математического моделирования и информационных технологии в земледелии и агроэкологии; 3. Разработка фундаментальных основ мониторинга состояния агроэкосистем и управления продукционным процессом; 4. Применение современных методов в селекции растений.

В сборнике представлены научные труды, посвященные широкому спектру проблем, решаемых в области агрофизики, почвоведения, растениеводства, микробиологии, генетики и селекции растений, физиологии, биохимии, математического моделирования и информационных технологий.

*Конференция проводится при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
грант РФФИ № 17-04-205285*

**Ответственные за выпуск:**

*Блохина С. Ю.*

*Агеенкова О. А.*

*Цивилев А. Ю.*

# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В. А. Вигонт, А. Г. Топаж, Е. В. Захарова

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (АФИ)*

Рассмотрение места и роли контура производства биогаза в цикле сельскохозяйственного производства растениеводческой продукции приводит к проблеме оптимизации этого производственного процесса. Для того, чтобы иметь возможность количественно оценить выход биометана в зависимости от используемого субстрата и регулярности его подачи/замены необходимо создание и развитие актуальных математических моделей. В докладе представлены результаты исследований авторов, направленные на модификацию и оптимизацию существующих стехиометрических моделей получения биометана из многокомпонентного растительного сырья. В качестве основного инструмента исследования была выбрана платформа мультипарадигменного имитационного моделирования AnyLogic.

Consideration of the place and role of the possible biogas production in the traditional food cropping systems leads to the problem of optimizing the digestion process in bioreactor. In order to be able to quantify the yield of biomethane depending on the substrate used and the regularity of its supply/replacement, it is necessary to create and develop the consistent mathematical models. The article presents the results of the authors' research intended for modifying and optimizing of existing stoichiometric models of biomethane production from multicomponent plant raw materials. The multi-paradigm simulation framework AnyLogic was chosen as the main research tool of the project.

Поиск альтернативных возобновляемых источников энергии уже давно рассматривается в качестве приоритетного направления развития промышленного и научного прогресса человечества. Важное место в этой сфере занимают технологии так называемой «зеленой энергетики», когда для производства топлива или прямого преобразования в тепловую энергию используется накопленная в результате фотосинтеза энергия, содержащаяся в биомассе высших растений. Побочным положительным эффектом внедрения биогазового контура в производственный процесс растениеводческого хозяйства может служить получение большого количества высококачественного сидерального удобрения, поскольку шлам, остающийся после анаэробного сбраживания в биореакторе, достаточно богат базовыми питательными соединениями и, в то же время, практически не содержит способных к прорастанию семян сорняков. Однако в условиях реального

севооборота имеющаяся зеленая биомасса, служащая сырьем для производства биогаза, может характеризоваться сильной неоднородностью состава, как в разные отрезки сельскохозяйственного производственного цикла, так и в конкретные моменты времени. И для того, чтобы включение контура производства биогаза в традиционный производственный цикл растениеводческого хозяйства было экономически и технологически оправданным, гипотетический реактор должен быть «всеядным» и обеспечивать эффективное и бесперебойное функционирование независимо от качества и степени разнородности одновременно потребляемых ресурсов. Для того, чтобы иметь возможность количественно оценить выход биометана в зависимости от используемого гетерогенного субстрата и регулярности его подачи/замены необходимо создание, развитие и детальное исследование адекватных математических моделей.

Ниже приводится описание подобной реализации, выполненной в среде многоподходного моделирования AnyLogic для модели технологического процесса анаэробного сбраживания неоднородной многокомпонентной растительной биомассы. Нами была взята за основу известная стехиометрическая модель производства биометана (Вавилин, 2010), произведена ее модификация для случая многокомпонентного сырья и продемонстрированы возможности современных оболочек и сред моделирования в задачах комплексного анализа и оптимизации изучаемого процесса.

Двухстадийная динамика трансформации исходного сырья в биогаз может быть в первом приближении описана следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений (Вавилин, 2008)

$$\begin{aligned}
 \frac{dW}{dt} &= -k \cdot W \cdot f_H(S) ; & W(0) &= W_0 \\
 \frac{dS}{dt} &= Y \cdot k \cdot W \cdot f_H(S) - \rho_M \cdot f_M(S) \cdot \frac{S \cdot B}{K_S + S} ; & S(0) &= 0 \\
 \frac{dP}{dt} &= Y \cdot (1 - \theta) \cdot \rho_M \cdot f_M(S) \cdot \frac{S \cdot B}{K_S + S} ; & P(0) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $W$  и  $S$  – концентрация исходного субстрата и продуктов гидролиза (жирных кислот);  $P$  – суммарный выход биогаза;  $k$  – константа скорости гидролиза;  $\gamma$  – коэффициент конверсии субстрата в жирные кислоты (стехиометрический коэффициент);  $\rho_M$  – максимальная удельная скорость метаногенеза в терминах утилизации биомассы летучих жирных кислот;  $K_S$  – константа полунасыщения в уравнении Моно для интенсивности метаногенеза;  $1-\theta$  – доля субстрата, идущая на образование биогаза,  $Y$  – переводной коэффициент потока утилизации жирных кислот в единицы выхода конечного продукта (биогаза).

Общее уравнение динамики микробной биомассы описывается соотношением:

$$\frac{dB}{dt} = \theta \cdot \rho_M \cdot f_M(S) \cdot \frac{S \cdot B}{K_S + S} - K_D \cdot B, \quad B(0) = B_0 \quad (2)$$

где  $K_D$  – коэффициент распада. Функции  $f_H(S)$  и  $f_M(S)$  описывают ингибирование реакций гидролиза и микробной ферментации жирными кислотами (Gerber, Span, 2008). Введение в модель функций ингибирования позволяет отразить наблюдающийся в реальности эффект «пробки», когда недостаток микробной биомассы или чрезмерное поступление субстрата приводит к тому, что реакция анаэробного сбраживания полностью тормозится промежуточным продуктом.

Наиболее естественной и «дешевой» модификацией этой стандартной модели может быть ее расширение на многокомпонентный случай, то есть учет неоднородности исходного сырья. Допустимо считать, что наиболее существенно эта неоднородность должна проявляться на стадии гидролиза, так как основное отличие разных видов растительного сырья проявляется именно в темпах его деструкции до легкоусвояемых полимеров, а дальнейшие трансформации идут уже над одними и теми же «смешавшимися в единый пул» продуктами гидролиза, генезис которых не имеет принципиального значения. Тогда элементарное расширение модели с целью учета многокомпонентного состава сырья получается путем замены скалярных величин в первом уравнении системы (1) на вектора и добавления операции суммирования по входным потокам продукта во второе уравнение этой системы.

Принципиальный момент работы биореактора – возможность постоянного возобновления исходного субстрата, то есть периодическая подгрузка на вход процесса новых партий сырья по мере его переработки в конечные продукты. Одновременно необходимо обеспечить также соответственное изъятие из реактора отработанной биомассы в виде отходов (шлама). Отражение этого технологического приема, то есть рециклизация процесса анаэробного брожения была учтена в имитационной модели путем введения в нее специального компонента – периодического триггера. Появление в исходной классической непрерывной поточно-балансовой формализации триггерной составляющей приводит к тому, что исследуемая модель приобретает черты как системно-динамического, так и дискретно-событийного подхода, то есть превращается в так называемую многоподходную или гибридную модель.

Для численного исследования построенной динамической системы ее образ был представлен в виде стандартной нотации модели системной динамики. Затем эта модель была реализована и детально исследована в серии простых имитационных и оптимизационных вычислительных экспериментов в специализированной среде многоподходного имитационного моделирования AnyLogic (Борщев, 2013). Проведенные исследования позволили отыскать наиболее эффективные параметры работы системы (частота и степень рециклизации сырья) как в дискретном, так и в непрерывном (проточном) режимах, когда биореактор функционирует как идеальный хемостат. Выборочные результаты экспериментов по анализу чувствительности различных рассмотренных критериев эффективности производственного процесса к параметрам рециклизации приведены на рис. 1.

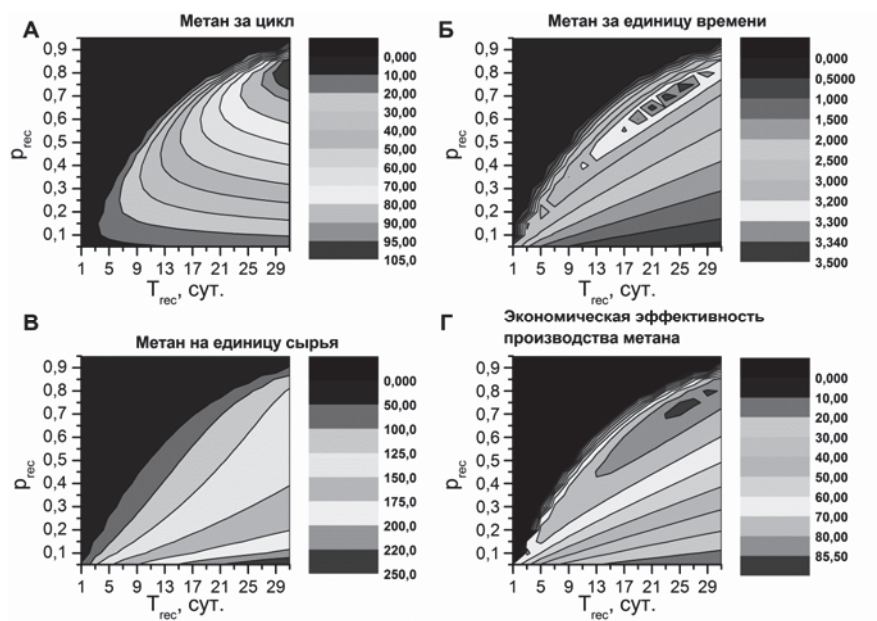


Рис. 1. Зависимости альтернативных критериев эффективности процесса производства биометана в реакторе анаэробного брожения от параметров режима рециклизации растительного сырья

Легко заметить, что в области невырожденных значений этих параметров наблюдается оптимум выбранных показателей, что соответствует наилучшим режимам работы модельного биореактора. При этом координаты областей оптимума оказываются крайне близки к «пропасти», соответствующей режиму «пробки». А так как пик гипотетической поверхности оптимума достаточно гладкий, то с практической точки зрения имеет смысл эксплуатировать реактор в области параметров, достаточно далеко отстоящей от бифуркационной границы. Это приведет к незначительным потерям экономической эффективности, но зато обеспечит устойчивую работу реактора без опасности срыва в полное прекращение процесса метаногенеза.

### Список литературы

1. Вавилин В.А. Исследование анаэробной деградации органических отходов: опыт математического моделирования // Микробиология, т.79, №3, 2010, С. 352-359.
2. Вавилин В.А. Как эффективно получать биогаз? // Природа, №11, 2008, С. 14-19.
3. Gerber M., Span, R. (2008). An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas // In: Proc., Int. Gas Union Research Conf., French Gas Association, Neuilly-sur-Seine, France.
4. Борщев А. Как строить простые, красивые и полезные модели сложных систем // Сборник трудов шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2013)», Казань, 16-18 октября 2013 г., Изд. «Фэн» АН РТ, т.1, с. 21-34.