

Введение Наиболее важным показателем, отражающим совершенство метантенка, является интенсивность протекающего в нем процесса. Следует отметить, что интенсивность тем выше, чем меньше время, затраченное на получение единицы заданного продукта, поэтому главной задачей при изучении процессов метанового брожения является установление функциональной зависимости времени пребывания в метантенке от различных факторов [1]. В ходе метанового брожения, как и в любом микробиологическом процессе, одним из ключевых факторов является время пребывания микроорганизмов в среде (время удерживания). Для обеспечения эффективного разложения сложных органических веществ необходимо, чтобы микроорганизмы находились в достаточном количестве, а время их пребывания в среде было достаточным для обеспечения метаболизма субстрата и при этом не происходило вымывание бактерий [2]. При определении среднего времени пребывания в аппарате широкое распространение получил эмпирический метод, реализующий модель «черного ящика». В сочетании с планированием эксперимента и регрессионными методами обработки его результатов он позволяет при минимальных затратах рабочего времени и материальных ресурсов получить достоверную информацию о процессах, справедливых в условиях эксперимента. Суть метода заключается в том, что в поток на входе в аппарат каким-либо способом вводят индикатор, а на выходе из аппарата измеряют концентрацию индикатора как функцию времени. В качестве индикатора используют пассивную примесь (краситель, раствор соли или кислоты, изотопы), которая не оказывает влияние на гидродинамический режим в аппарате. При этом должно быть обеспечено подобие поведения частиц индикатора в аппарате и частиц основного потока. С этой точки зрения, лучшими индикаторами являются изотопы, так как они мало различаются с основным потоком по свойствам. Однако на практике обычно применяют доступные индикаторы, концентрация которых может быть легко измерена. К таким индикаторам относятся растворы солей (электролиты). Недостатком этого метода является трудность переноса результатов лабораторных исследований на промышленный объект и вызванная этим низкая точность и надежность расчета промышленной аппаратуры. Другим недостатком является полное игнорирование физики процесса, что затрудняет его логический анализ с целью изучения влияния на него различных факторов [1]. Тем не менее, это очень распространенный метод исследования. Первыми проанализировали время пребывания в метантенке Grobicki и Stuckey в 1992 г. Они пришли к выводу, что метантенк с перегородками можно охарактеризовать как ряд реакторов с мешалками, при этом, чем больше число отсеков, тем ближе аппарат к реактору идеального вытеснения [3]. Исследования времени пребывания в аппаратах с неньютоновскими рабочими жидкостями провели Li и Choplin (1992). Они выявили, что распределение времени пребывания псевдопластических жидкостей характеризуется моделью идеального вытеснения, а дилатантных

жидкостей – моделью идеального смешения [3]. В 1996 г. Gravilescu и Tudose определили среднее время пребывания в эрлифтном биореакторе с внешней рециркуляцией [3]. Конструктивно новый аппарат – метантенк с перегородками периодического действия, был изучен в 1998 году Skiadas и Lyberatos. Производительность аппарата оценена по времени пребывания и значению ХПК [3]. Bello-Mendoza и Sharratt (1999 г.) разработали новую модель смешения, основанную на исследовании времени пребывания в имитационном анаэробном реакторе с барботажным перемешиванием [3]. В 2000 году Batstone впервые получил гидравлические характеристики полномасштабного, двухступенчатого метантенка с восходящим потоком жидкости. Он установил, что распределение времени пребывания можно охарактеризовать моделью идеального смешения [3]. Liu и соавт. (2007 г.), исследовали время пребывания в трех промышленных периодических анаэробных реакторах с перегородками, используемых для очистки сточных вод китайского фармакологического предприятия [3].

Взаимосвязь между временем перемешивания и временем пребывания в реакторе с мешалкой исследовали в 2008 году Roussinova и Kresta [3]. Они определили время перемешивания как время, необходимое для того, чтобы дисперсия нормализованной концентрации трассеров уменьшилась до 5% от конечной средней концентрации. Были даны рекомендации для проектирования аппарата: перемешивающее устройство должно находиться на линии, условно проходящей от патрубка загрузки до патрубка выгрузки, а отношение гидравлического времени удержания к времени перемешивания не должно быть меньше 10. В 2009 году Langner J.M. исследовал влияние расположения входного патрубка и наличие радиальных и концентрических перегородок в метантенке на среднее время удержания [3].

Современные методы математического моделирования и численные методы расчета процессов, протекающих в метантенках, позволяют определять среднее время пребывания в аппарате без громоздких и часто небезопасных экспериментов. В настоящее время известны работы, в которых исследование времени пребывания в аппарате было основано на применении численных методов. На основе программного пакета Fluent 6.0 Madeira L.M., Alves M.A. и Rodrigues A.E. в 2004 году численно определили распределение времени пребывания в резервуаре водоочистных сооружений. Это была двумерная модель аппарата с ламинарным гидродинамическим режимом. Авторы определили среднее время пребывания в аппарате и объем «мертвых зон» в зависимости от числа Re и геометрических характеристик аппарата (соотношение высоты и диаметра резервуара) [4]. В 2004 году с помощью программного пакета Comsol Multiphysics 3.0 Rosen E.M. смоделировал аналогичную задачу и определил среднее время пребывания в резервуаре водоочистных сооружений при  $Re=10$  и соотношении высоты к диаметру, равном единице [5]. В 2006 году Gualtieri C. провел численные исследования двух контактных резервуаров с различным расположением перегородок внутри с

помощью программного пакета Comsol Multiphysics 3.2b. Он разработал двумерную модель аппарата с турбулентным гидродинамическим режимом [6]. В данной работе проведено трехмерное численное моделирование метантенков непрерывного действия без перемешивания. Математическая модель

Математическое моделирование в метантенке непрерывного действия проведено при следующих допущениях: субстрат является гомогенной жидкостью, вязкость и плотность которой зависят от концентрации; процессы диффузии пренебрежимо малы по сравнению с конвективным переносом массы; температура постоянна. Концентрация индикатора на входе рассматривалась для метода ступенчатого возмущения. (1) (2) (3) где  $\vec{v}$  - вектор скорости, м/с;  $t$  - время, с;  $\frac{d}{dt}$  - субстанциональная (полная) производная по времени;  $\sigma$  - тензор напряжений, Па;  $p$  - давление, Па;  $\mathbf{I}$  - единичный тензор;  $\mathbf{D}$  - тензор скоростей деформации;  $\mu$  - вязкость субстрата, Па·с;  $\vec{g}$  - вектор ускорения свободного падения, с - концентрация индикатора [7, 8]. Начальные гидродинамические условия: .

Граничные условия для скорости: на твердых границах резервуара задаются условия прилипания жидкости; на входных отверстиях задаются профили скорости, соответствующие сформировавшемуся профилю скорости ньютоновской жидкости в круглой трубе; на открытой границе:  $p = p_0$ , где  $p_0$  - давление газа,  $\vec{n}$  - нормаль к поверхности субстрата. Метантенки представляют собой цилиндры с одинаковыми геометрическими размерами, но с различным расположением патрубков загрузки и выгрузки органического субстрата (рис. 1).

а б Рис. 1 – Метантенки Объем исследуемого реактора метанового брожения составляет 0,7854 м<sup>3</sup>. Соотношение высоты к диаметру аппарата 1:1. Радиус патрубков для загрузки и выгрузки субстрата одинаков и равен 0,025 м. Расход жидкости 0,00015 м<sup>3</sup>/с. Субстрат: свиной навоз с содержанием сухого вещества 6%. Температурный режим – термофильный. В метантенках нет перемешивающего устройства. Метантенк 1. Патрубки загрузки и выгрузки субстрата расположены параллельно, на некотором расстоянии друг от друга на боковой поверхности (рис. 1а). Верхний патрубок является подающим, а нижний служит для отвода перебродившего субстрата. Метантенк 2 (рис. 1б). Патрубок для загрузки субстрата расположен в центре крышки метантенка, а патрубок для выгрузки эффлюента – на дне аппарата, по центру. Результаты численных исследований В результате численных расчетов, на основе данных о концентрации на выходе была построена функция отклика. Для метантенка функция отклика  $F(t)$  на ступенчатое возмущение имеет вид: (Danckwerts, 1953):

$$F(t) = \frac{C_{out}(t) - C_{in}}{C_{in} - C_{out}(0)} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (4)$$

где  $C_{out}(t)$  - концентрация индикатора на выходе из метантенка,  $C_{in}$  - концентрация индикатора на входе в метантенк ( $C_{in}$ ). Функция  $F(t)$  асимптотически достигает значения единицы. Обычно применяется безразмерное время  $\theta$ , которое представляет собой отношение времени  $t$  к теоретическому значению времени пребывания  $\theta$ , которое равно отношению рабочего объема метантенка к расходу органического субстрата, подаваемого в аппарат. Для метода ступенчатого

возмущения функция распределения времени пребывания вычисляется по следующей формуле [6]:

$$f(t) = \frac{1}{V} \int_0^t \frac{dV}{dt} e^{-\lambda t} dt \quad (5)$$

На основании функции распределения (5) вычисляется среднее время пребывания в аппарате:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (6)$$

Относительное среднее время пребывания в метантенке может быть рассчитано как:

$$\bar{t} / \tau \quad (7)$$

При этом для вычисления интеграла (7) область  $[0, \infty)$  делится точкой  $M$  на две: первая область от нуля до точки  $M$  и вторая, где кривая начинает свое монотонное асимптотическое убывание до нуля («хвост»). Интеграл от 0 до  $M$  вычисляется численно, а для вычисления интеграла по второй области функция распределения времени пребывания аппроксимируется экспоненциальной функцией, где параметры  $A$  и  $B$  вычисляются с учетом рассчитанных точек функции. Тогда (7) запишется как

$$\bar{t} = \int_0^M t f(t) dt + \int_M^{\infty} t A e^{-Bt} dt \quad (8)$$

Как было сказано выше, первый интеграл вычисляется численно, а второй легко вычислить аналитически. Величина среднего времени пребывания дает возможность судить об эффективности аппарата. Наличие «мертвых зон» в метантенке снижает его эффективность. В работе [4] объем «мертвых зон» в метантенке определен следующим образом:

$$V_{\text{мз}} = V \left( 1 - \frac{\bar{t}}{\tau} \right) \quad (9)$$

В результате численных расчетов для резервуаров, представленных на рис. 1, были рассчитаны и построены функции распределения времени пребывания (рис. 2 и рис. 3). Среднее время пребывания для метантенка 1: Объем «мертвых зон» соответственно равен. Рис. 2 – Время пребывания в метантенке 1 На рис. 2 видно, что максимальное значение времени пребывания равно 1,1. Наблюдается довольно длинный «хвост», что свидетельствует о достаточно долгом пребывании частиц в аппарате. Однако, объем «мертвых зон» незначителен, так как поступающие порции органического субстрата удерживаются достаточное время, для того чтобы прошли основные биохимические реакции. Незначительное количество загружаемого материала оседает на дне аппарата. Полученная кривая времени пребывания в метантенке 2 состоит из основной части от  $\theta = 0$  до  $\theta = 0,0267$  и «хвоста» от  $\theta = 0,0267$  до  $\infty$ : Объем «мертвых зон» составляет. На рис. 3 максимальное значение времени пребывания равно 45, что свидетельствует о значительном байпасном потоке. Расположение патрубков для загрузки и выгрузки субстрата способствует тому, что часть жидкости движется параллельно аппарату, в результате чего большая часть потока попадает на выход, не претерпевая никаких изменений (т.е. происходит проскок части потока). Рис. 3 – Время пребывания в метантенке 2 Таким образом, сравнительный анализ процессов в двух метантенках с различной загрузкой на основе расчета величины «мертвых зон» показывает, что использование первого метантенка предпочтительнее. Расположение патрубков загрузки и выгрузки субстрата в значительной степени влияет на среднее время пребывания в аппарате, и, соответственно, скорость протекания биохимических реакций и производительность аппарата по биогазу. Заключение На примере двух метантенков с различным расположением входных и выходных труб рассмотрено численное решение задачи определения среднего времени

пребывания в аппарате. На основе полученных данных проведен сравнительный анализ эффективности аппаратов. Представленный метод определения времени пребывания представляет собой достаточно простой и эффективный метод решения задачи с помощью пакета программ Comsol Multiphysics 3.5a.