

Защита от перенапряжений с помощью емкостного накопителя необходима для защиты транзисторов в случаях аварийных отключений токов короткого замыкания; при перенапряжениях, приходящих со стороны питающей сети; а также ограничивает скачки напряжений при коммутации ключей с нулевой паузой [3]. Это связано с тем, что в транзисторах МПЧ, в отличие от ДПЧ, отсутствуют обратные диоды в качестве защиты от пробоя.

#### Заключение

Разработан МПЧ со скалярным управлением, основанным на применении пространственно-векторной ШИМ. Матрица собрана из двунаправленных ключей на основе MOSFET. При проектировании использованы схемы быстродействующей токовой защиты и защиты от коммутационных перенапряжений.

#### Библиографические ссылки

1. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново : Изд-во ИГЭУ,

2008. – 298 с. – URL: [http://vectorgroup.ru/files/doc/books/vinogradov\\_book.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/books/vinogradov_book.pdf) (дата обращения: 18.04.2014).

2. *Климов В., Климова С.* Двунаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // *Силовая электроника*. – 2008. – № 4. – С. 58–61.

3. *Карташев Е., Колтаков А.* Базовые принципы проектирования матричных конверторов // *Силовая электроника*. – 2009. – № 5. – С. 59–65.

4. *Морозов А. В., Барсуков В. К., Морозов В. А.* Разработка матричного преобразователя частоты // *Интеллектуал. системы в пр-ве*. – 2013. – № 2. – С. 202–207.

5. *Сидоров С.* Матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления // *Силовая электроника*. – 2009. – № 3. – С. 31–35.

6. *Титяев Д. К., Мирошник Д. Н.* Сравнительный анализ векторной и традиционной широтно-импульсной модуляции // *Автоматизация технологических объектов та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 11–14 травня 2004 р.* – Донецьк : ДонНТУ, 2004. – С. 301–306. – URL: <http://masters.donntu.edu.ua/2007/fema/dovgan/library/2.pdf> (дата обращения: 18.04.2014).

\* \* \*

*A. V. Morozov*, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*V. K. Barsukov*, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*V. A. Morozov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Control algorithms and circuitry of the matrix frequency converter

*The principle of forming the output voltage of the matrix frequency converter due to space vector PWM is described in details. Practical implementation of schemes for converter protection is given.*

**Keywords:** frequency converter, bidirectional power switch, space vector PWM, microcontroller

Получено: 16.04.14

УДК 628.315

*Р. Г. Шаяхметов*, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУБСТРАТА В МЕТАНТЕНКЕ

*Описан принцип оценки эффективности перемешивания субстрата в биореакторе с помощью функции желательности Харрингтона. Для проведения анализа выделены критерии оценки полей температур и скоростей, полученных в результате численного эксперимента.*

**Ключевые слова:** метантенк, перемешивание субстрата, функция желательности Харрингтона, автоклав, анаэробное сбраживание

В настоящее время энергосбережение является стратегической задачей государственного масштаба. Одним из наиболее актуальных методов в данном направлении является использование альтернативных источников энергии, в частности биогаза. Биогаз образуется вследствие анаэробного сбраживания в метантенках, которые представляют собой цилиндрические железобетонные резервуары с коническим днищем и применяются для сбраживания осадков бытовых и производственных сточных вод. Интенсивность и стабильность выхода биогаза повышается при рациональной организации перемешивания субстрата внутри биореактора [3]. Перемешивание способствует выравниванию концентраций метаболитов, образующихся в

процессе брожения и являющихся промежуточными субстратами для микроорганизмов или ингибиторами их жизнедеятельности, а также концентрации токсичных веществ, содержащихся в загружаемом осадке, поддержанию тесного контакта между бактериальными ферментами и их субстратами и т. д.

При плохом перемешивании снижается эффективный объем метантенка и сокращается время пребывания в нем осадка, а следовательно, распад органического вещества и выход биогаза. При внедрении в конструктив новых устройств необходимо следить за эффективным объемом биореактора, полученном после установки нового приспособления. Известны случаи сокращения полезного объема метантенка на 70 %.

Для решения задачи по повышению эффективности процесса перемешивания осадка была разработана методика определения технических параметров конструкций метантенков, основывающаяся на оценке гидродинамических и температурных полей биореакторов. Согласно данной методике, первоначально проводится математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов, описываемых системой дифференциальных уравнений Навье – Стокса [2]. В расчете принят термофильный режим сбраживания, так как при нем наблюдается повышенная скорость разложения сырья и, следовательно, более высокий выход биогаза, а климатические условия соответствуют г. Ижевску.

В качестве экспериментальных конструкций при проведении численного исследования были испытаны существующие запатентованные конструкции метантенков с различными вариантами циркуляционных устройств: с цилиндрической циркуляционной трубой различного диаметра, с цилиндрической трубой в форме усеченного конуса, расширяющейся частью вверх и вниз различных диаметров и углов наклона направляющих, ромбообразными, трапециевидными и другими конструкциями.

(соблюдения единого температурного режима во всем объеме), объема области с соблюдением необходимого для анаэробного сбраживания температурного режима. Также среди основных критериев определения эффективности процесса перемешивания необходимо учитывать процент застойных (холодных) зон, сокращающих эффективный рабочий объем метантенка. Результаты проведенных экспериментов выявили, что во всех конструкциях максимальные температуры и скорости наблюдаются в центральной зоне – зоне циркуляционной трубы непосредственно от входа до выхода. Следовательно, основным критерием оценки в данном случае являются параметры температур и скоростей в других зонах биореактора. Наименьшие температуры наблюдаются вдоль стенок конструкций в связи с теплопотерями, в расчете принята температура наружного воздуха –34 °С для зимнего времени г. Ижевска. Температура поступающего субстрата максимальна на входе и в верхних зонах, в нижних зонах температура незначительно снижается. В некоторых областях температуры менее 53 °С, то есть в данных зонах не соблюдается термофильный режим сбраживания и процесс неэффективен.

На основании полученных температурных и гидродинамических полей на следующем этапе методики с целью анализа влияния конструктива биореактора на эффективность перемешивания на основании были выделены критерии оценки эффективности процесса перемешивания субстрата в метантенке:

1. Равномерность поля температур в объеме метантенка, % (y1)

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность процесса перемешивания, является стабильность температурного поля и отсутствие разброса температур между различными зонами метантенка. Определяется отношением объема зон с равномерным температурным полем к общему объему биореактора.

2. Равномерность поля скоростей в объеме метантенка, % (y2)

Критерий оценивает равномерность процесса перемешивания осадка, основываясь на скорости движения субстрата в различных зонах метантенка. Определяется отношением объема зон с равномерным полем скоростей к общему объему биореактора.

3. Значения максимальных скоростей движения осадка, м/с (y3)

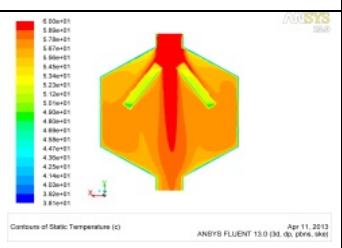

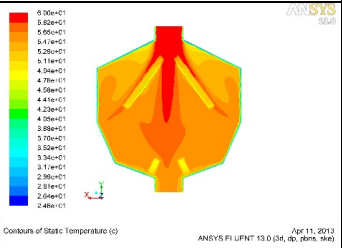
Большие скорости перемешивания осадка обеспечивают больший выход биогаза. Определяется значениями на полях скоростей

4. Объем биореактора, занимаемый дополнительной конструкцией, % (y4)

Устройство, совершенствующее процесс перемешивания, не должно сильно сокращать рабочую зону метантенка. Определяется отношением объема, занимаемого дополнительной конструкцией, к общему объему биореактора.

5. Количество застойных зон в объеме метантенка, % (y5)

Критерий оценивает содержание объем содержания холодных застойных зон в метантенке, в кото-

| Изображение конструкции   | Описание конструкции   | Характеристика конструкции  |
|---|--|---|
|   | Конструкция метантенка с одной конусообразной трубой расширением конуса вниз     | Поле температур достаточно, равномерно. Максимальная температура наблюдается в центральной зоне биореактора, присутствуют застойные зоны в нижней и верхней зонах |
|  | Конструкция метантенка с одной конусообразной трубой расширением конуса вверх    | Поле температур неравномерно. Максимальная температура наблюдается в центральной зоне биореактора, преобладают застойные зоны в нижней и верхней зонах            |
|  | Конструкция метантенка с двумя конусообразными трубами расширениями конусов вниз | Температурное поле равномерно, температура термофильного режима соблюдается в 80 % объема метантенка. Застойные зоны практически отсутствуют                      |

Полученные поля температур и скоростей [4] целесообразно оценивать по признаку однородности

рых не соблюдается температурный режим сбраживания. Определяется отношением объема зон с температурным и гидродинамическим режимом, не обеспечивающим температурный режим сбраживания и скорости перемешивания в котором близки или равны нулю, к общему объему биореактора.

6. Количество зон, занимаемых температурой режима сбраживания в объеме биореактора, % (у6)

Критерий оценивает, в какой части объема биореактора соблюдается предусмотренный технологическим процессом режим, а в какой он идет с нарушением. Определяется отношением объема зон с соблюдением температурного режима сбраживания к общему объему биореактора.

Таблица 1. Установленная шкала частных показателей

|         |             |          |                   |          |              |
|---------|-------------|----------|-------------------|----------|--------------|
| Y1, %   | 0–16        | 16–29    | 29–45             | 45–65    | 65–100       |
| Y2, %   | 0–15        | 15–30    | 30–40             | 40–55    | 55–100       |
| Y3, %   | 0–0,1       | 0,1–0,2  | 0,2–0,4           | 0,4–0,6  | 0,6–1        |
| Y4, м/с | 100–45      | 45–35    | 35–25             | 25–15    | 15–5         |
| Y5, %   | 25–100      | 15–25    | 9–15              | 5–9      | 0–5          |
| Y6, %   | 0–15        | 15–32    | 32–55             | 55–70    | 70–100       |
| Оценка  | 0–0,2       | 0,2–0,37 | 0,37–0,63         | 0,63–0,8 | 0,8–1        |
|         | Очень плохо | Плохо    | Удовлетворительно | Хорошо   | Очень хорошо |

На основании вышеописанных параметров оценки принимается единый обобщенный критерий, объединяющий в себе результаты значений всех перечисленных. Для проведения анализа эффективности перемешивания в конструкциях метантенков была выявлена возможность применения обобщенной

функции желательности Харрингтона, использование которой позволяет разные по своей физической сущности и своей размерности частные параметры оценки эффективности перевести в единую безразмерную шкалу оценки, а затем свернуть в единый обобщенный критерий.

За основу математического аппарата пересчета конкретных параметров в абстрактные числовые значения принята одна из логистических функций Харрингтона – так называемая «кривая желательности».

Шкала желательности делится в диапазоне от 0 до 1 на пять поддиапазонов, конкретные параметры сравниваемых систем распределяются в масштабе, соответствующем предъявляемым к ним требованиям, на промежутке эффективных значений шкалы частных показателей (табл. 1). Затем соответствующие им показатели  $y_1, y_2...y_6$  пересчитываются в отметки на шкале желательности  $d_1, d_2... d_6$ . Полученное значение  $d(i)$  для  $i$ -го параметра пересчитывается вместе с другими в обобщенный коэффициент желательности –  $D$ . Он вычисляется по формуле

$$D = \sqrt[n]{d(1) \cdot d(2) \cdot \dots \cdot d(n)},$$

где  $n$  – число используемых показателей параметров сравнения для данной системы.

На основании оценки результатов моделирования построены графики функции желательности Харрингтона для каждой конструкции биореактора. Примеры построенных функций приведены на рис. 2, а–в. В соответствии с полученными графиками показатели сводятся в табл. 2, рассчитан обобщенный коэффициент желательности  $D$ .

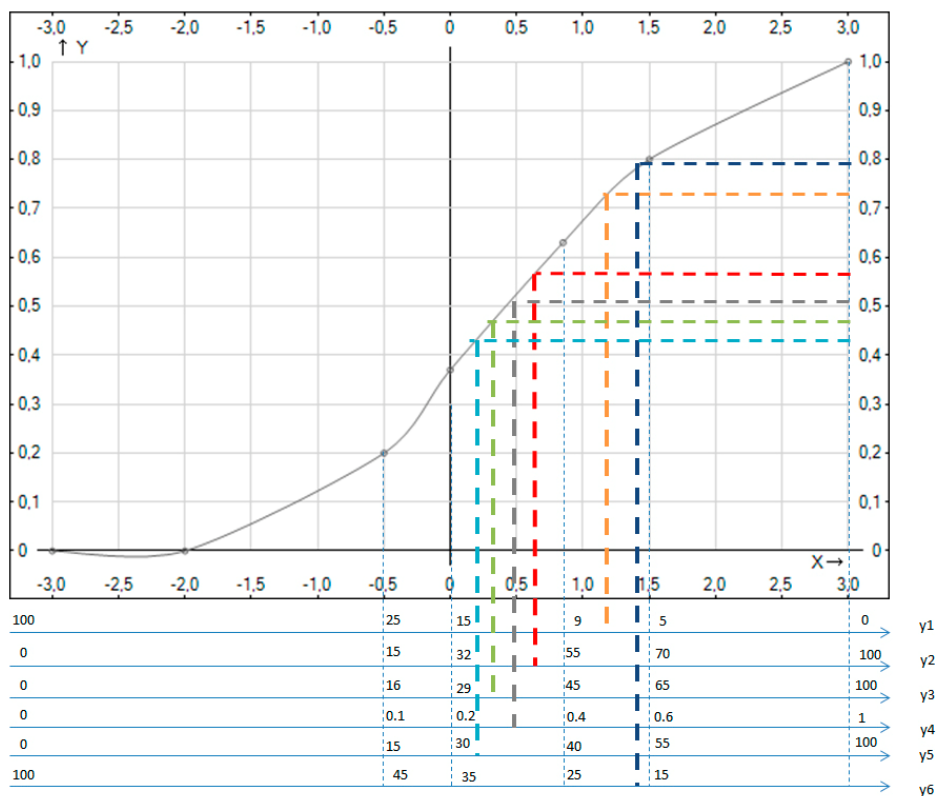


Рис. 1. Графики функции желательности для различных конструкций метантенков (начало)

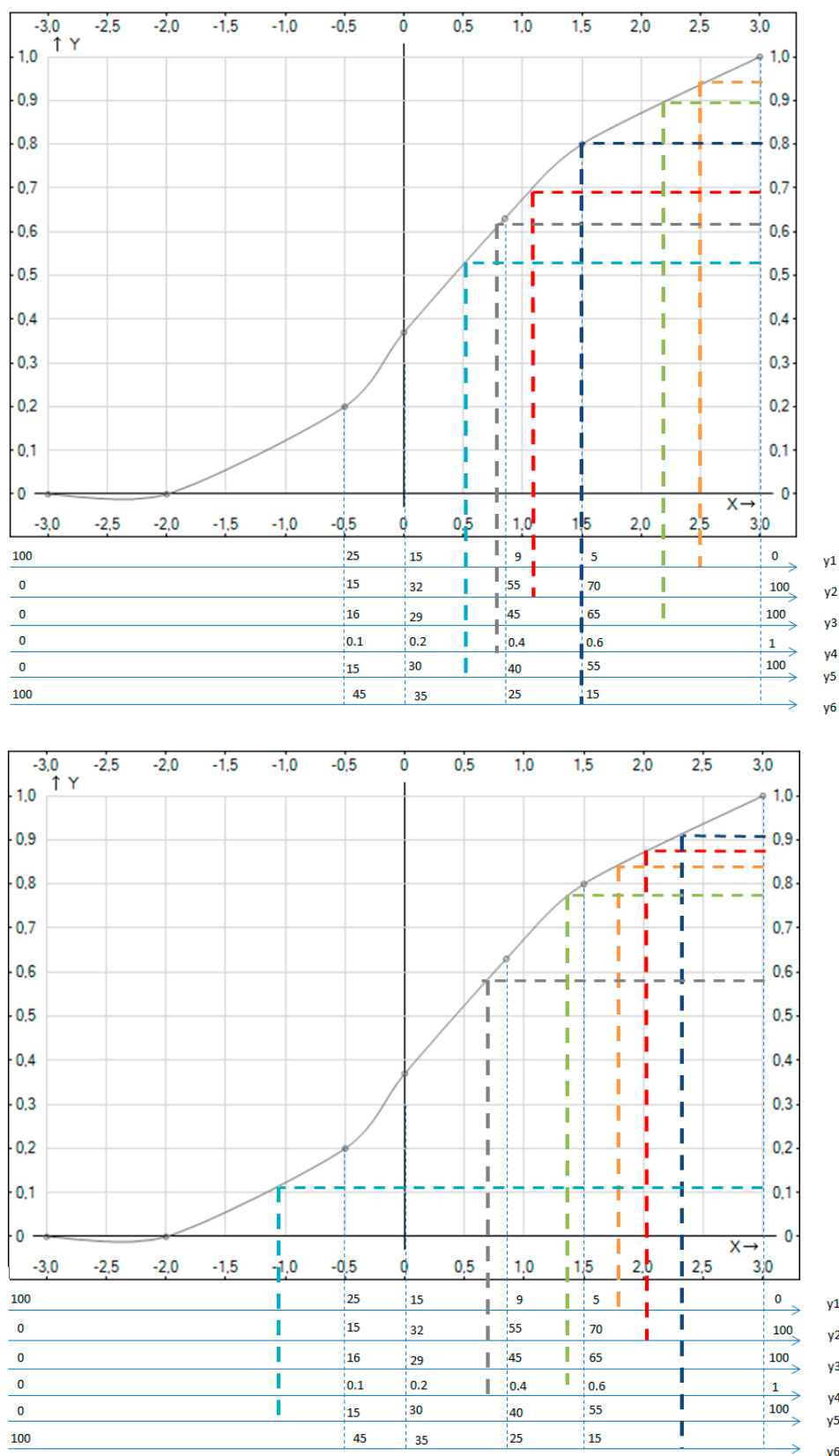


Рис. 1. Графики функции желательности для различных конструкций метантенков (окончание)

Указанные в табл. 2 конструкции 1–5, 7–9, 12, 13, 20, 23, 24 и 26 представляют собой метантенки с различными модификациями угла наклона стенок и с одной конусообразной циркуляционной трубой, установленной под разными углами. Биореакторы 6,

10, 11, 16 имеют по две конусообразные циркуляционные трубы. Остальные конструкции не имеют циркуляционных труб либо имеют сложные конструкции с перегородками.

Таблица 2. Значения отметок по шкале желательности для рассчитанных конструкций

| Номер опыта | Натуральные значения откликов |       |       |      |       |       | Частные желательности |      |      |      |      |      | D1    | Оценка по шкале желательности |              |
|-------------|-------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-----------------------|------|------|------|------|------|-------|-------------------------------|--------------|
|             | y1                            | y2    | y3    | y4   | y5    | y6    | d1                    | d2   | d3   | d4   | d5   | d6   |       |                               |              |
| 1           | 7,00                          | 50,00 | 33,00 | 0,30 | 32,00 | 17,00 | 0,72                  | 0,57 | 0,47 | 0,51 | 0,41 | 0,79 | 0,03  | 0,56                          | хорошо       |
| 2           | 5,00                          | 15,00 | 30,00 | 0,30 | 15,00 | 25,00 | 0,80                  | 0,20 | 0,40 | 0,51 | 0,20 | 0,64 | 0,004 | 0,40                          | плохо        |
| 3           | 2,00                          | 30,00 | 30,00 | 0,41 | 33,00 | 10,00 | 0,91                  | 0,33 | 0,38 | 0,64 | 0,43 | 0,90 | 0,03  | 0,55                          | хорошо       |
| 4           | 2,00                          | 25,00 | 20,00 | 0,28 | 27,00 | 10,00 | 0,91                  | 0,58 | 0,23 | 0,50 | 0,33 | 0,90 | 0,02  | 0,51                          | удовл.       |
| 5           | 3,00                          | 15,00 | 5,00  | 0,25 | 32,00 | 20,00 | 0,88                  | 0,20 | 0,05 | 0,45 | 0,41 | 0,74 | 0,00  | 0,33                          | очень плохо  |
| 6           | 2,00                          | 30,00 | 35,00 | 0,46 | 38,00 | 25,00 | 0,91                  | 0,33 | 0,47 | 0,68 | 0,60 | 0,63 | 0,04  | 0,58                          | хорошо       |
| 7           | 1,00                          | 40,00 | 60,00 | 0,29 | 26,00 | 15,00 | 0,97                  | 0,14 | 0,75 | 0,51 | 0,31 | 0,80 | 0,01  | 0,48                          | удовл.       |
| 8           | 2,00                          | 65,00 | 70,00 | 0,31 | 28,00 | 15,00 | 0,91                  | 0,75 | 0,83 | 0,54 | 0,38 | 0,80 | 0,09  | 0,67                          | хорошо       |
| 9           | 3,00                          | 15,00 | 5,00  | 0,33 | 34,00 | 20,00 | 0,85                  | 0,20 | 0,05 | 0,57 | 0,45 | 0,74 | 0,00  | 0,34                          | очень плохо  |
| 10          | 2,00                          | 60,00 | 80,00 | 0,38 | 35,00 | 15,00 | 0,98                  | 0,68 | 0,90 | 0,62 | 0,53 | 0,80 | 0,16  | 0,74                          | очень хорошо |
| 11          | 1,00                          | 80,00 | 77,00 | 0,62 | 44,00 | 23,00 | 0,96                  | 0,88 | 0,90 | 0,84 | 0,72 | 0,68 | 0,31  | 0,82                          | очень хорошо |
| 12          | 1,00                          | 81,00 | 72,00 | 0,47 | 35,00 | 13,00 | 0,97                  | 0,87 | 0,90 | 0,72 | 0,53 | 0,85 | 0,25  | 0,79                          | очень хорошо |
| 13          | 2,00                          | 75,00 | 30,00 | 0,22 | 30,00 | 20,00 | 0,91                  | 0,83 | 0,38 | 0,40 | 0,37 | 0,74 | 0,03  | 0,56                          | хорошо       |
| 14          | 7,00                          | 50,00 | 5,00  | 0,35 | 33,00 | 55,00 | 0,73                  | 0,58 | 0,05 | 0,59 | 0,43 | 0,12 | 0,00  | 0,29                          | очень плохо  |
| 16          | 4,00                          | 63,00 | 49,00 | 0,32 | 27,00 | 21,00 | 0,83                  | 0,77 | 0,69 | 0,56 | 0,35 | 0,72 | 0,06  | 0,63                          | хорошо       |
| 19          | 7,00                          | 50,00 | 25,00 | 0,20 | 19,00 | 35,00 | 0,73                  | 0,58 | 0,34 | 0,37 | 0,23 | 0,37 | 0,00  | 0,41                          | плохо        |
| 20          | 4,00                          | 80,00 | 68,00 | 0,36 | 10,00 | 7,00  | 0,84                  | 0,87 | 0,78 | 0,58 | 0,11 | 0,91 | 0,03  | 0,57                          | хорошо       |
| 21          | 5,00                          | 65,00 | 66,00 | 0,45 | 40,00 | 12,00 | 0,80                  | 0,78 | 0,83 | 0,69 | 0,64 | 0,86 | 0,20  | 0,76                          | очень хорошо |
| 22          | 4,00                          | 50,00 | 15,00 | 0,25 | 20,00 | 24,00 | 0,82                  | 0,58 | 0,19 | 0,45 | 0,24 | 0,65 | 0,01  | 0,43                          | плохо        |
| 23          | 1,00                          | 45,00 | 25,00 | 0,28 | 31,00 | 13,00 | 1,00                  | 0,43 | 0,34 | 0,50 | 0,33 | 0,83 | 0,02  | 0,52                          | удовл.       |
| 24          | 5,00                          | 25,00 | 20,00 | 0,23 | 26,00 | 32,00 | 0,80                  | 0,58 | 0,23 | 0,41 | 0,30 | 0,41 | 0,01  | 0,42                          | плохо        |
| 25          | 5,00                          | 25,00 | 30,00 | 0,26 | 28,00 | 17,00 | 0,80                  | 0,58 | 0,38 | 0,47 | 0,38 | 0,77 | 0,02  | 0,54                          | удовл.       |
| 26          | 5,00                          | 65,00 | 35,00 | 0,35 | 23,00 | 14,00 | 0,80                  | 0,78 | 0,47 | 0,59 | 0,26 | 0,81 | 0,04  | 0,58                          | хорошо       |
| 27          | 3,00                          | 20,00 | 32,00 | 0,27 | 20,00 | 28,00 | 0,85                  | 0,23 | 0,41 | 0,49 | 0,23 | 0,57 | 0,01  | 0,42                          | плохо        |
| 28          | 6,00                          | 40,00 | 32,00 | 0,30 | 38,00 | 22,00 | 0,79                  | 0,50 | 0,45 | 0,55 | 0,58 | 0,74 | 0,04  | 0,59                          | хорошо       |
| 29          | 6,00                          | 25,00 | 10,00 | 0,10 | 31,00 | 0,00  | 0,78                  | 0,30 | 0,15 | 0,20 | 0,41 | 1,00 | 0,00  | 0,38                          | плохо        |
| 30          | 80,00                         | 23,00 | 18,00 | 0,05 | 33,00 | 22,00 | 0,00                  | 0,29 | 0,22 | 0,17 | 0,45 | 0,71 | 0,00  | 0,00                          | очень плохо  |

Основываясь на результатах проведенных экспериментов и выполненного анализа в соответствии с выбранными критериями, необходимо обратить внимание на различие результатов между стандартными конструкциями и метантенками с циркуляционными коническими трубами. Благодаря установке более эффективно не только в центральной зоне, но и в большей части своего объема. Среди конструкций с циркуляционными трубами на основании полей скоростей выбрать наиболее эффективную достаточно сложно, так как все модели показали близкие скорости, отличаясь при этом наличием таких скоростей в разных зонах. Высокую однородность температурных и гидродинамических полей имеют конструкции, включающие в себя по две конусообразные циркуляционные трубы (в верхней и нижней зонах). За счет грамотного размещения данных механизмов происходит перемешивание во всех зонах метантенка. В конструкции метантенка со скошенными углами в нижней части метантенка образуется меньшее число застойных зон, чем при стандартной конструкции. Полученные результаты проведенных экспериментов показали эффективность внедрения

перемешивающего устройства в виде циркуляционной трубы в конструкцию метантенка благодаря максимальному исключению застойных зон и поддержанию термофильного режима в его объеме.

Разработанная методика анализа продуктивности работы метантенков на основе оценки процесса перемешивания по полям температур и скоростей свидетельствует о возможности применения при разработке и совершенствовании существующих конструкций биореакторов новых подходов, которые по сравнению с существующими методами позволяют проводить анализ нескольких конструкций за рекордно малые сроки.

#### Библиографические ссылки

1. Пичкалев А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. – 2012. – № 1. – С. 25–28. – URL: <http://www.fsfu.org/doc/journal/archive/01/paper6.pdf> (дата обращения: 15.05.2014).
2. Шаяхметов Р. Г., Исаков В. Г. Численное моделирование процесса циркуляционного перемешивания осадков сточных вод в метантенках // Актуальные проблемы современного строительства, энергосберегающие техноло-

гии : сб. материалов Междунар. конф. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2011. – С. 166–173.

3. Шаяхметов Р. Г. Исследование способов перемешивания в метантенках // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2011. – № 4. – С. 18–20.

4. Шаяхметов Р. Г., Исаков В. Г., Ефремов С. М. Опыт применения программного комплекса Ansys Workbench для моделирования процессов перемешивания в метантенках // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 127–131.

\*\*\*

R. G. Shayakhmetov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### **Application of Harrington desirability function for assessing the efficiency of substratum hashing in a digester**

*In the present article the principle of assessing the efficiency of substratum hashing in the bioreactor by means of E. C. Harrington desirability function is described. In order to perform the analysis, criteria are stated to assess the fields of temperatures and speeds obtained as a result of numerical experiment.*

**Keywords:** digester, substrate hashing, E. C. Harrington's desirability function, autoclave, anaerobic digestion

Получено: 12.05.14