

Введение Работы по обоснованию и оптимизации теплового режима в метантенках, а также микробиологическому исследованию химических процессов проводили российские ученые Панцхава Е.С., Друзьянова В.П., Марченко В.И., Келов К., Ковалев А.А. и др.; и зарубежные ученые: Chen Y., Hashimoto A.G., Safley L.M., Westerman P.W., Toprak H., Masse D.I., Droste R.L., Minott S.J., Blumensaat F. и др. [1-3]. В литературе известны работы, посвященные изучению процессов теплопереноса и гидродинамики в реакторах метанового брожения. Fleming (2002) [4] разработал трехмерную модель гидродинамики и теплообмена для покрытых лагун. Vesvikar и Al-Dahhan (2005) провели трехмерное, стационарное моделирование для определения картины течения внутри реактора с барботажным перемешиванием. Впервые результаты численных исследований были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в результате применения метода меченых атомов (изотопных индикаторов) [5]. Grebrenedhin (2005) разработал одномерную комплексную модель теплообмена для реактора идеального вытеснения [6]. На основе этой модели Wu и Bibeau (2006) [7] разработали трехмерную модель теплопереноса для анаэробных реакторов, работающих в холодных климатических условиях. Wu and Chen (2008) создали трехмерную модель гидродинамики для метантенков. Течение субстрата в реакторе – турбулентное [8]. Результаты численных исследований были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в лабораторных и опытно-промышленных условиях. В отечественной литературе моделирование теплообмена в реакторе метанового брожения, как правило, сводится к инженерным расчетам [9-12]. Численному моделированию процессов теплопереноса в метантенке посвящено малое количество работ (Землянка А.А., 2004; Вачагина Е.К., 2009; Кудряшова А.Г., 2011; Шаяхметов Р.Г., 2011). Землянка А.А. (2004) описал процессы теплообмена и гидродинамики в цилиндрическом метантенке с погруженным в него цилиндрическим теплообменником [13]. Вачагина Е.К. (2009) создала математическую модель движения двухфазной газожидкостной среды в цилиндрическом ферментаторе биогазовой установки [14]. Кудряшова А.Г. (2011) разработала математическую модель процесса нагрева биомассы с использованием энергии трубчатого электронагревателя [15]. Шаяхметов Р.Г. (2011) разработал модель циркуляционного перемешивания субстрата в метантенке [16]. В данной работе предложена математическая модель теплообмена в системе поддержания температурного режима в реакторе метанового брожения. Математическая модель Математическая модель получена для реактора цилиндрической формы. Для поддержания температуры в реакторе используется теплообменник в виде труб спирально навитых с внешней стороны реактора, по которым циркулирует теплоноситель (вода). Для минимизации потерь тепла в окружающую среду реактор и трубы покрыты слоем изоляции. Основные допущения: 1) Процессы переноса тепла в резервуаре

определяются теплопроводностью и свободной конвекцией; 2) Течение жидкости в резервуаре носит ламинарный характер; 3) Окружная составляющая скорости жидкости в резервуаре незначительна; 4) Поле скоростей в греющих трубах характеризуется наличием только одной окружной составляющей скорости; 5) Процессом переноса тепла за счет теплопроводности в направлении основного движения жидкости в греющих трубах по сравнению с конвективным переносом тепла можно пренебречь; 6) Теплофизические характеристики жидкости в резервуаре за исключением плотности, и в греющих трубах, а также теплофизические характеристики слоя изоляции в ходе процессов теплопереноса не меняются; 7) Плотность жидкости в резервуаре является функцией температуры; 8) Силами тяжести при движении жидкости в греющих трубах можно пренебречь. Математическая модель рассматриваемой задачи получена на основе уравнений механики сплошных сред [17] и имеет следующий вид. Уравнения движения, неразрывности и переноса энергии для жидкости в резервуаре: область 1: (1) (2) (3) , (4) где - переменные цилиндрической системы координат; - время; - безразмерные переменные: ; ; , - характерный линейный размер (диаметр обогревающих каналов); - радиальная и осевая составляющие вектора скорости и соответствующие им безразмерные компоненты: , ; - среднерасходная скорость жидкости в обогревающих каналах; - расход жидкости через обогревающие каналы; - безразмерная температура; - температура; - температура окружающего резервуар воздуха; - температура греющего теплоносителя на входе в обогревающие трубы; - давление; - безразмерное давление; - плотность жидкости; - плотность жидкости при температуре . Уравнение переноса тепла в слое изоляции: область 2: , (5) где - температуропроводность слоя изоляции; - плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности тепловой изоляции. Уравнение переноса тепла в круглых трубах, навитых на резервуар область 3: , (6) где температуропроводность греющего теплоносителя; - плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности греющего теплоносителя; - безразмерная скорость движения жидкости в греющих трубах; - скорость движения жидкости в греющих трубах, которая имеет параболический характер для ламинарных режимов течения; . , (7) где - радиус резервуара; - вертикальная безразмерная координата центров окружностей греющих труб, которая в случае расположения греющих труб по окружностям не зависит от координаты и вычисляется для -той трубы по формуле: , (8) где - расстояние между центрами греющих труб, а в случае спирально навитых труб зависит от координаты и вычисляется по формуле: , (9) где - расстояние между центрами греющих труб при изменении угла на величину , - вертикальная безразмерная координата центра окружности наиболее низко расположенной греющей трубы. Каждая из рассмотренных областей характеризуется следующими диапазонами изменения независимых переменных задачи: Условия однозначности для рассматриваемой системы

уравнений имеют вид: I. Гидродинамические условия: 1. На границах области 1 и области 3 задаются гидродинамические условия прилипания жидкости: На границах области 1 это условие запишется в виде 1) для z , где z - высота слоя жидкости в резервуаре; 2) для r ; 3) для θ . На границе области 3, определяемой соотношениями: это условие запишется в виде $z = z_0$, где z_0 - конечное значение угловой координаты. 2. Считается заданным расход греющего теплоносителя через обогревающие трубы, это условие уже учтено при записи выражения для скорости u . II. Граничные условия для температуры: 1. На поверхностях, разделяющих области ставятся граничные условия четвертого рода: На границе, разделяющей области 1 и 3, определяемой соотношениями: $r = R$, где R - часть длины окружности греющих труб, непосредственно, примыкающей к резервуару. На границе, разделяющей области 1 и 2, определяемой соотношениями: $r = r_0$. На границе, разделяющей области 2 и 3, выполняются условия: $T = T_0$, где номера, стоящие около соответствующих неизвестных распределений температур соответствуют номерам рассматриваемых областей. 2. На поверхностях, разделяющих области 1 и 2 от окружающего пространства ставятся граничные условия третьего рода: На границах области 1 это соотношение запишется в виде: 1) для z , 2) для r : $\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{T - T_{\infty}}{\delta}$. На границе области 2, определяемой соотношениями: $r = r_0$: это условие запишется в виде: $\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{T - T_{\infty}}{\delta}$, где δ - толщина слоя изоляции; α_1 - коэффициенты теплоотдачи от поверхности и от дна резервуара, α_2 - коэффициент теплоотдачи от слоя изоляции в окружающий воздух. 3. На входе в греющие трубы считается заданной температура жидкости: $T = T_0$. III. Условия периодичности гидродинамических и температурных полей в резервуаре по пространственной переменной θ : область 1: $\theta = 0$. IV. Начальные условия: 1. В начальный момент времени считается заданным распределение поля скоростей в областях 1 и 2. область 1: Жидкость в резервуаре в начальный момент времени находится в состоянии покоя: $u = 0$. область 3: Жидкость в греющих трубах имеет развитый изотермический профиль скорости u , определенный выше. 2. В начальный момент времени считается заданным значение температуры во всех трех областях: область 1,2,3: $T = T_0$; где T_0 - начальное значение температуры. Данная система уравнений описывает процессы теплопереноса при любом расположении обогревающих труб. Основное различие состоит в определении поверхностей, разделяющих области определения переменных рассматриваемой задачи. Решение поставленной выше задачи будет производиться с помощью метода конечных элементов. При этом в процессе решения предполагается вычисление следующих интегральных характеристик задачи: - среднее значение температуры жидкости в резервуаре; - количество тепла, переданное в единицу времени от поверхности резервуара; - количество тепла, переданное в единицу времени от поверхности греющих труб в резервуар. При произвольных режимных характеристиках рассматриваемых процессов передачи тепла, таких как расход греющей жидкости и ее температуры процессы передачи тепла

являются нестационарными процессами. На практике часто необходимо найти частное решение поставленной выше задачи, а именно задачи поддержания некоторой постоянной температуры в резервуаре. При этом необходимо определить, необходимые для этого значения расхода и температуры греющей жидкости, которые методом последовательных уточнений, т.е. последовательным увеличением температуры греющей жидкости на входе. Критерием окончания такого процесса при этом является постоянство величины - средней температуры жидкости в резервуаре и равенство соответствующих количеств теплоты. Заключение В данной работе предложена математическая модель теплообмена в системе поддержания температурного режима в реакторе метанового брожения, позволяющая рассчитывать гидродинамические и температурные поля внутри реактора.