

Введение Решение задач проектирования оптимальных химико-технологических процессов невозможно без учета неопределенности, присутствующей в исходной информации о процессе. Формализация задачи проектирования имеет вид задачи условной оптимизации, причем в зависимости от формы учета возможности управления ХТС задача принимает одну из форм: 1. одноэтапной задачи оптимизации (ОЭЗО), постановка которой возникает в предположении неизменности управлений на этапе функционирования. 2. двухэтапной задачи оптимизации (ДЭЗО), которая предусматривает возможность изменения управлений на этапе функционирования в зависимости от состояния ХТС; В зависимости от требования выполнения ограничений задачи проектирования оптимальных ХТС различают мягкие или вероятностные ограничения, выполнение которых требуется с заданной вероятностью, либо ограничения, которые должны выполняться безусловно – жесткие ограничения. В настоящее время методы решения ОЭЗО получили значительное развитие, как в постановке с жесткими так и с мягкими ограничениями [3, 4, 5]. Для двухэтапных задач с жесткими ограничениями методы решения предложены в [1, 2]. В отличие от ОЭЗО с мягкими ограничениями, методы решения ДЭЗО с мягкими ограничениями получили меньшее развитие. Трудности формулирования и решения этой задачи были показаны в [7]. В [8] рассмотрен подход к решению задачи, который не гарантировал требуемую вероятность выполнения мягких ограничений. Для решения ДЭЗО с мягкими ограничениями нами предложен подход в [6]. Запишем двухэтапную задачу оптимизации с мягкими ограничениями (1) , , , где – -вектор конструктивных переменных, – -вектор управляющих переменных, – -вектор неопределенных параметров, , где – область неопределенности, область – допустимая область для переменных и , , , есть вероятностная мера области , , . В дальнейшем будем предполагать, что все неопределенные параметры являются независимыми случайными величинами и имеют нормальное распределение . Сведение вероятностной задачи оптимизации к детерминированной Основная проблема решения задачи (1) состоит в большой трудоемкости вычисления многомерных интегралов и . В [6] показано, что задачу с вероятностными ограничениями (1) можно свести к задаче с детерминированными ограничениями, получив при этом верхнюю оценку задачи (1) (2) , , , где , вероятность попадания нормально распределенных независимых случайных величин в диапазон , – функция стандартного нормального распределения, величины , . В задаче (2) управляющие переменные могут иметь любую форму зависимости от неопределенных параметров . Ограничив возможный вид зависимости линейным видом, получим , где параметры являются векторами размерности . Для того, чтобы линейная аппроксимация давала хорошее качество приближения необходимо, чтобы область неопределенности имела малый размер. Решение задачи (2) требует выполнения трудоемкой операции вычисления . Для

упрощения решения задачи в [4] было предложено проводить разбиение неопределенности на подобласти, где в каждой подобласти аппроксимировать математическое ожидание функции математическим ожиданием линейной аппроксимации. В [6] было предложено проводить одновременное улучшение аппроксимации критерия задачи (2) и аппроксимации управлений, проводя одновременное разбиение области неопределенности и. На i -ой итерации задача (2) примет вид (3), где n_i – количество подобластей области для i -го ограничения на i -ой итерации. Задача (3) является задачей полубесконечного программирования. Для возможности применения к решению задачи метода внешней аппроксимации в [6] предложено провести замену переменных, в результате чего была получена задача (4), где $\bar{u}_i$ – оптимальное значение управления u_i на i -ой итерации. Вычислительный эксперимент В задаче (4) управления представлены зависимостью от неопределенных параметров на подобласти. Предложенный подход к решению двухэтапной задачи оптимизации химико-технологической системы был рассмотрен для двух видов зависимости управлений от неопределенных параметров: кусочно-постоянной: (5) кусочно-линейной (6). Для аппроксимации функции цели в критерии задачи использовалась кусочно-постоянная зависимость. Технологическая система состоит из реактора и теплообменника с рециклом (Рис. 1) [9]. В реакторе объема протекает экзотермическая реакция первого порядка вида $A \rightarrow B$. Рецикл (с расходом G) используется для управления температурой T в реакторе. Противоточный теплообменник служит для охлаждения рециклического потока, используя холодную воду с расходом W , кг*моль/ч. Процесс служит для получения целевого продукта B . Неопределенными параметрами задачи являются G , K , K_c , m , Q (мЗ/кг*моль*ч), (кДж/м²). Область неопределенности характеризуется отклонениями от номинальных значений неопределенных параметров (см. табл. 1). В качестве критерия оптимальности использованы приведенные затраты, где S – площадь теплообменника. Рис. 1 – Технологическая схема примера 2

Математические модели реактора и теплообменника имеют вид:

Конструктивные переменные: G . Управляющие переменные: T . Таблица 1 - Отклонение неопределенных параметров от номинального значения

Параметр	Номинал	45.36	393	300	9.81	1635.34	0.1	0.02	0.03	0.1	0.1
Величины в таблице 1											

имеют следующие размерности: G – кг*моль/ч, K – К, K_c – мЗ/кг*моль*ч, Q – кДж/м². Область неопределенности имеет вид 5-мерного параллелепипеда, в котором каждый параметр находится в пределах отрезка $[\bar{p}_i - \Delta p_i, \bar{p}_i + \Delta p_i]$, где $\bar{p}_i$ – номинальное значение. Ограничения в задаче имеют вид: Результаты применения предложенного подхода с использованием двух видов зависимости управляющих переменных от неопределенных параметров (5), (6) представлены в таблице 2. Для каждой итерации приводятся – оптимальное значение целевой функции задачи (4), оптимальные значения конструктивных параметров: объема реактора и поверхности теплообмена в теплообменнике, – кумулятивное по

итерациям время решения задачи, сек. Из таблицы видно, что использование кусочно-постоянной аппроксимации управлений позволяет сократить время вычислений на порядок в сравнении с использованием кусочно-линейной аппроксимации. Однако время вычисления сильно увеличивается на последних итерациях, а на первых мало. В то же время видно, что использование кусочно-линейной аппроксимации управлений дает лучшие значения критерия и конструктивных переменных в сравнении с кусочно-постоянной аппроксимацией управлений. Очевидно, что при использовании кусочно-линейной аппроксимации управлений (6) задача (4) имеет большую размерность, поскольку количество поисковых переменных для каждой подобласти области неопределенности увеличивается на по сравнению с аппроксимацией (5). Большая степень свободы позволяет получать лучшее решение, однако увеличение размерности задачи по поисковым переменным требует больших вычислительных затрат. Таблица 2 – Результаты решения двухэтапной задачи при разных видах аппроксимации управлений

Итерация	Кусочно-постоянная	Кусочно-линейная
0	9860 5,64 7,24 0,11	9839 5,58 7,28 0,4
1	9860 5,64 7,24 4	9854 5,58 7,35 1,3
2	9837 5,57 7,27 20	9893 5,58 7,42 7,5
3	9861 5,57 7,37 117	9910 5,58 7,51 62
4	9865 5,57 7,39 314	9860 5,64 7,24 0,11
5	9940 5,8 7,28 0,13	9839 5,58 7,28 0,4
6	9913 5,73 7,31 0,4	9854 5,58 7,35 1,3
7	9928 5,73 7,39 1,5	9893 5,58 7,42 7,5
8	10006 5,81 7,47 8	9910 5,58 7,51 62
9	9913 5,73 7,31 8	9860 5,64 7,24 4
10	9928 5,73 7,39 43	9837 5,57 7,27 20
11	9967 5,73 7,45 412	9861 5,57 7,37 117

В таблице: – заданная вероятность выполнения ограничений, – номер итерации. Выводы Анализ полученных результатов показывает, что на первых итерациях реализации подхода, когда подобласти области неопределенности, полученные дроблением, еще имеют большой размер, использование кусочно-линейной зависимости для аппроксимации управлений может дать лучший результат, поскольку количество подобластей области неопределенности на начальных итерациях еще мало. Это видно из таблицы 2 по значениям на первых итерациях. На последних итерациях количество подобластей сильно увеличивается, и при использовании кусочно-линейной аппроксимации экспоненциально растет число поисковых переменных. В то же время, на последних итерациях работы подхода с увеличением числа подобластей области неопределенности подобласти становятся малыми по размеру и зависимость управлений от неопределенных параметров на подобласти может быть хорошо аппроксимирована кусочно-постоянной зависимостью. Это позволит сократить время вычислений на последних итерациях и уменьшить общие вычислительные затраты.