

А. А. Андрижиевский, д-р. техн. наук, профессор;
 О. Н. Веремева, мл. науч. сотрудник; А. Г. Трифонов, д-р техн. наук
 (Объединенный институт энергетических и ядерных исследований «Сосны»)

КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

The problem of increase of power and economic efficiency of the technological equipment is substantially connected to procedure of optimization of base heat-and-mass transfer processes.

Use of a package MATLAB in tasks of modelling and optimization of heat-and-mass transfer devices allows quickly and with a high degree of accuracy to calculate optimized criterion function, and in case of necessity to carry out updating base model or kind of optimality criterion.

The authors developed the code of optimization of drying installation on the basis of the criterion function representing the sum of specific costs. The code is developed in MATLAB environment and is complemented by the «friendly» interface admitting interactive management by a sequence of performance of set of m-functions.

Проблема повышения энергетической и экономической эффективности технологического оборудования в значительной степени связана с процедурой оптимизации базовых тепломассообменных процессов. При этом многие производственные задачи достижения наилучшего, оптимального режима работы технологического оборудования сводятся к минимизации так называемых *целевых функций*.

Наиболее общей постановкой оптимальной задачи служит выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки.

При определении вида целевой функции оптимизации могут быть использованы критерии различного вида – технологические, термодинамические, экономические и т. п. Наиболее общим и полным представляется технико-экономический критерий эффективности в виде суммы приведенных затрат, т. е. показателей удельных капитальных и эксплуатационные затрат (рис. 1):

$$F_{\text{и}} = \frac{S_{\text{кап}}}{T_{\text{н.о}}} + S_{\text{э}},$$

где $S_{\text{кап}}$ – капитальные затраты; $T_{\text{н.о}}$ – нормативный срок окупаемости капитальных затрат; $S_{\text{э}}$ – эксплуатационные затраты.

Первый показатель непосредственно зависит от стоимости оборудования и его монтажа, второй включает в себя следующие основные составляющие:

- начальные капиталовложения;
- эксплуатационные расходы;
- топливную составляющую.

Достаточно высокие удельные характеристики поверхностей теплообмена сушильных установок делают особенно актуальной задачу оптимизации их массогабаритных характеристик на основе выбранных критериев оптимальности.

На первых этапах проведения процесса оптимизации следует выбирать параметры, которые мало изменяются на дальнейших стадиях. К таким параметрам, например, для тепломассообменных устройств, относятся диаметр труб, характеристики оребрения, среднегодовые показатели систем охлаждения (при оптимизации конденсаторов) и др. Напротив, толщина стенки и длина труб обычно претерпевают изменения уже в техническом проекте, когда учитываются температурные напряжения, входные и выходные участки и т. д.

При математической формулировке задачи оптимизации технологических устройств и лежащих в их основе тепломассообменных процессов возникает проблема составления их адекватного математического аналога. При этом следует помнить, что эффективность процесса оптимизации непосредственно связана с математической сложностью рассматриваемой задачи и соответствием математической модели возможной точности конечных результатов.

Кроме того, следует иметь в виду, что при реализации процедуры оптимизации возникает задача минимизации функции в области, принадлежность к которой задается условием выполнения большого числа ограничений – равенств или неравенств. Наличие ограничений существенно усложняет задачу минимизации – как правило, точкой экстремума оказывается некоторая граничная точка области.

Опыт решения задач оптимизации показывает, что в первую очередь стоит попробовать применить методы, имеющие естественную наглядную интерпретацию.

Авторами разработана программа оптимизации сушильной установки на основе целевой функции, представляющей собой сумму приведенных затрат. Программа выполнена в среде MATLAB и дополнена «дружественным» интерфейсом, допускающим интерактивное управление последовательностью выполнения множества m-функций.

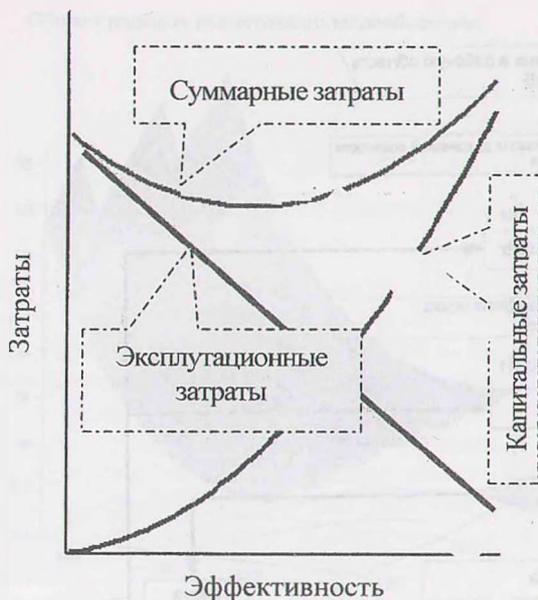


Рис. 1. Обобщенный график зависимости эффективности технологического оборудования от величины приведенных капитальных и эксплуатационных затрат

В качестве объекта практического применения данного алгоритма оптимизации выбран технологический процесс сушки материалов. В данном примере пакет MATLAB применяется для оптимизации барабанной сушильной установки (рис. 2).

Барабанная сушилка представляет собой наклонный цилиндрический барабан. Основные узлы сушилки: топка, вращающийся барабан, разгрузочное устройство и устройство для очистки и удаления отходящих газов. Материал поступает с приподнятого конца барабана через питатель, захватывается винтовыми лопастями, на которых он подсушивается, после чего перемещается вдоль барабана. Для повышения интенсивности сушки вращающийся барабан оборудуется встроенными подъемно-лопастными насадками, равномерно распределяющими материал по сечению барабана.

Высушиваемый материал обогревается через стенку внутренней трубы, конструктивные параметры которой нужно определить, дымовыми газами от сгорания промышленных опилок.

Расчет процесса оптимального варианта целевой функции – минимальных экономических затрат – производится в соответствии с представленной на рис. 3 блок-схемой.

Выполняются два цикла – по расходу горячего теплоносителя и диаметру внутренней трубы, т. е. при каждом значении G_{1tr} проводится расчет целевой функции при всех значениях d_1 . Затем определяются числа Рейнольдса Re , Прандтля Pr и, при необходимости, Грасгофа Gr . По значению Re определяется режим течения для каждой пары значений G_{1tr} и d_1 .

В зависимости от режима течения с помощью условного оператора *if* выбирается формула для расчета коэффициента теплоотдачи α_1 и коэффициента сопротивления трению ζ_1 внутри трубы. В межтрубном пространстве α_2 вычисляется по приведенным зависимостям для дисперсного слоя высушиваемого материала, согласно [2].

Далее производится расчет коэффициента теплопередачи k и расчетной теплоты Q_2 , требуемой для всего процесса сушки.

Эксплуатационные затраты определяются исходя из мощности на прокачку греющего теплоносителя и вращение барабана.

Результаты расчета суммы приведенных затрат формируются в виде квадратной матрицы, из которой затем определяется минимум функции, а также значения диаметра внутренней трубы и расхода дымовых газов при найденном минимуме. Если же при заданных условиях результаты расчета не попадают в область допустимых значений, в командное окно MATLAB выводится сообщение об ошибке.

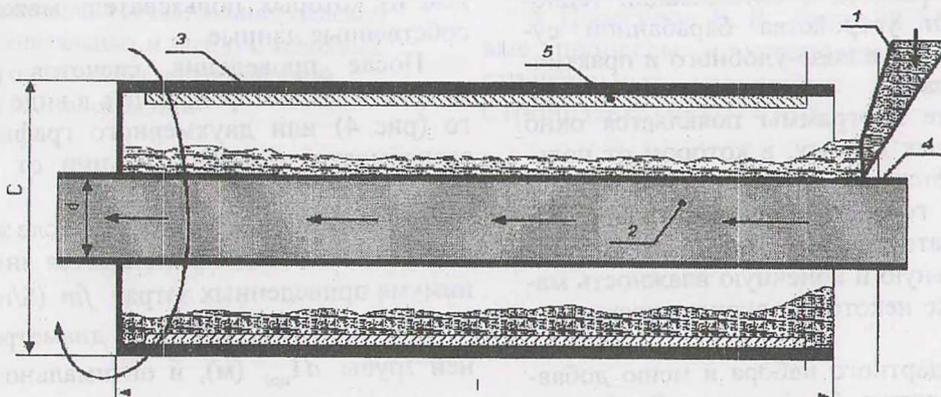


Рис. 2. Контактная барабанная сушилка непрямого действия:
1 – подача влажного материала; 2 – теплоноситель; 3 – вращающийся барабан;
4 – внутренняя труба; 5 – подъемно-лопастная насадка

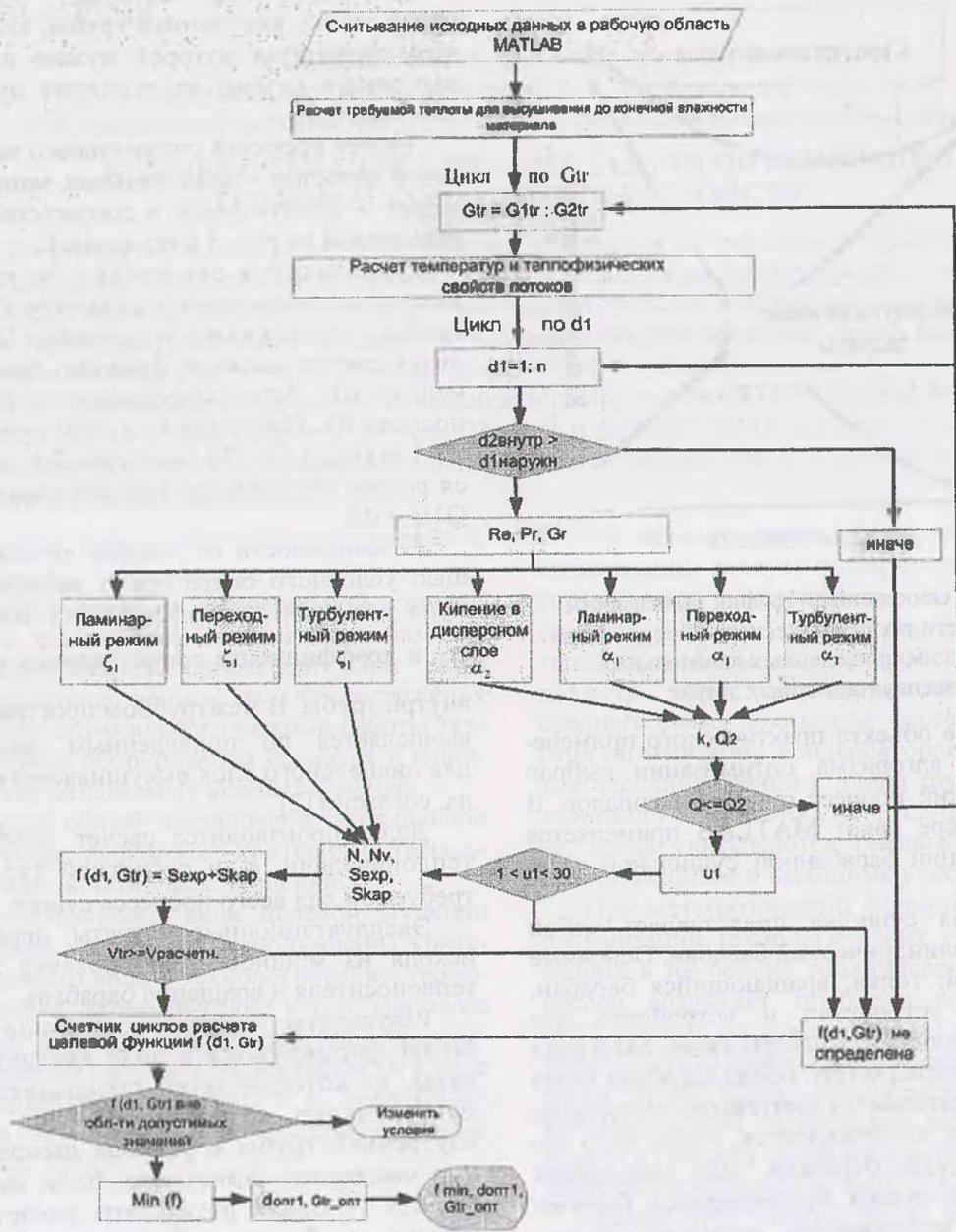


Рис. 3. Блок-схема вычислительного алгоритма

Программа расчета и оптимизации тепло-массообменного устройства барабанной сушилки реализуется в виде удобного и практичного интерфейса.

При запуске программы появляется окно задания исходных данных, в котором от пользователя требуется задать температуры входа и выхода потока горячего теплоносителя и высушиваемого материала, их расходные характеристики, начальную и конечную влажность материала, а также некоторые экономические параметры.

Кроме стандартного набора в меню добавлены новые пункты: *Свойства* и *Оребрение*. Пункт *Свойства* содержит три подпункта: *Теплофизические свойства*, *Задание параметров трубы и диаметров* и *Материал труб*, в каж-

дом из которых пользователь может задавать собственные данные.

После проведения расчетов результаты можно наглядно представить в виде трехмерного (рис. 4) или двухмерного графика (рис. 5) зависимости целевой функции от различных параметров.

В рабочем окне MATLAB после завершения расчетных циклов записываются значения минимума приведенных затрат f_m (\$/год) и соответствующее ему значение диаметра внутренней трубы $d1_{opt}$ (м), и оптимального расхода дымовых газов G_{opt} (м³/ч), а также скорость дымовых газов $u1_{opt}$ (м/с) при оптимальных значениях других параметров.

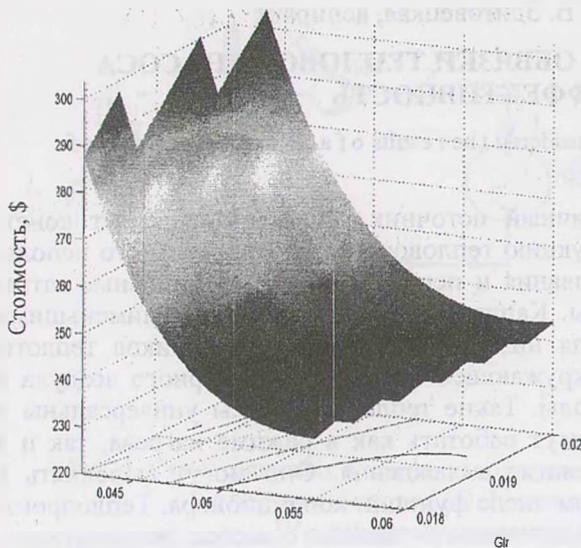


Рис. 4. Выбор оптимальных характеристик барабанной сушилки из минимума целевой функции

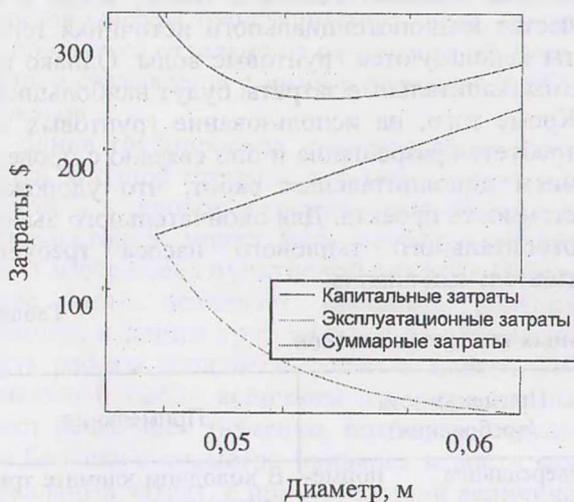


Рис. 5. Зависимость составляющих целевой функции (капитальных и эксплуатационных затрат) от диаметра теплообменной поверхности

Приведенный пример компьютерной реализации задачи оптимизации барабанной сушильной установки в полной мере демонстрирует весь комплекс встроенных возможностей системы MATLAB. В рамках предлагаемого программного пакета все расчеты выполняются с приемлемой для практического применения скоростью. Точность результатов в данном случае определяется шагом разбиения передаваемых в рабочую область варьируемых параметров и качеством исходных данных.

Описанная методика оптимизации и программное обеспечение могут быть использованы для практического применения специалистами, а также в качестве иллюстративного материала в вузовских дисциплинах, связанных с теплофизикой, моделированием и оптимизацией тепломассообменных процессов в технологических аппаратах различного типа.

Данная методика может быть распространена на более сложные типы сушильного тепломассообменного оборудования, а также на тепломассообменные системы.

Литература

1. Иоселиани А. Н., Михалевич А. А., Нестеренко В. Б., Салуквадзе М. Е. Методы оптимизации параметров теплообменных аппаратов АЭС. – Мн.: Наука и техника, 1981. — 144 с.
2. Берман М. И., Горбис З. Р. Анализ процесса и обобщение опытных данных по теплообмену при кипении на поверхностях нагрева, помещенных в дисперсный слой твердых частиц. – 1980. – Т. 38, № 1. – С. 5–15.
3. Дейч В. Г., Стальский В. В. Оптимальное управление процессами сушки во вращающейся барабанной сушилке // Теоретические основы химической технологии – 1975. – Т. 9, № 1. – С. 1028–1033.
4. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1967. – 847 с.
5. Перегудов В. В., Роговой М. И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.