

### Список литературы

1. Двойрис А.Д., Сиротин А.Г., Сахарова Г.П. Интенсификация процессов сжижения природного газа // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. – № 4. – С. 145–151.
2. Новотельнов В.Н., Бодио Е., Вильчек М., Хоровский М. Углеводороды вместо фреонов в бытовых холодильниках // Холодильная техника. – 1989. – № 3. – С. 31.
3. Васильев Л.Л., Журавлёв А.С., Овсянник А.В., Новиков М. Н., Васильев Л. Л. мл. Теплообмен при кипении пропана на поверхностях с капиллярно-пористой структурой // Теплообмен – ММФ-2000. Труды 4-го Минского международного форума по теплообмену. – Мн.: АНК ИТМО НАН Беларуси, 2000. – Т. 5. – С. 161–167.

**А.А. Андрижиевский, А.Г. Трифонов, О.Н. Веремеева,  
Э.А. Михалычева**

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований  
(ОИЭЯИ) – «Сосны» НАН Беларуси, г Минск

### **КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА**

Проблема повышения энергетической и экономической эффективности технологического оборудования в значительной степени связана с процедурой оптимизации базовых тепло-массообменных процессов. При этом сравнительный анализ возможных решений может быть наиболее просто и мобильно выполнен в рамках модельных исследований. В качестве объекта практического применения данного алгоритма оптимизации выбран технологический процесс сушки материалов в барабанной сушильной установке с использованием местных видов топлива.

Оптимизация сушильных установок является одной из первоочередных задач при проектировании сушильного оборудования. В качестве критериев оптимальности для сушильных аппаратов и установок наиболее часто используются следующие показатели: минимальной себестоимости готовой продукции, минимальных энергетических затрат, минимальных потерь продукта.

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

задачи служит выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки.

Авторами разработана программа оптимизации сушильной установки на основе такой целевой функции, представляющей собой приведенные затраты. Программа выполнена в среде MATLAB и дополнена «дружественным» интерфейсом, допускающим интерактивное управление последовательностью выполнения множества  $m$ -функций. Интерактивная среда позволяет пользователю оперативно вводить и корректировать исходные числовые и текстовые данные, а также визуализировать промежуточные и конечные результаты в текстовом или графическом формате.

Многие производственные задачи достижения наилучшего, оптимального режима работы технологического оборудования сводятся к минимизации так называемых целевых функций.

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 приведенных затрат, т.е. показателей удельных капитальных и эксплуатационных затрат (рис. 1):

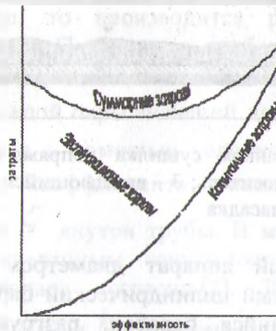


Рис. 1. Обобщенный график зависимости эффективности технологического оборудования от величины приведенных капитальных и эксплуатационных затрат

$$F_{ц} = \frac{S_{кап}}{T_{н.о.}} + S_{э} \quad (1)$$

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

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

- зависящую от начальных капиталовложений;

- зависящую от эксплуатационных расходов;
- топливную составляющую.

Входящие в капитальную составляющую приведенных затрат монтажные и пуско-наладочные работы принимаются ~ 10...15 % от стоимости оборудования.

Анализ показывает, что изменения некоторых параметров оказывают влияние на характеристики другого оборудования. При этом возникают ситуации, когда эти изменения приводят к прямо противоположным эффектам. Тогда следует использовать комплексные показатели для всей установки.

Барабанная сушильная установка, выбранная в качестве объекта оптимизации, изображена на рисунке 2.

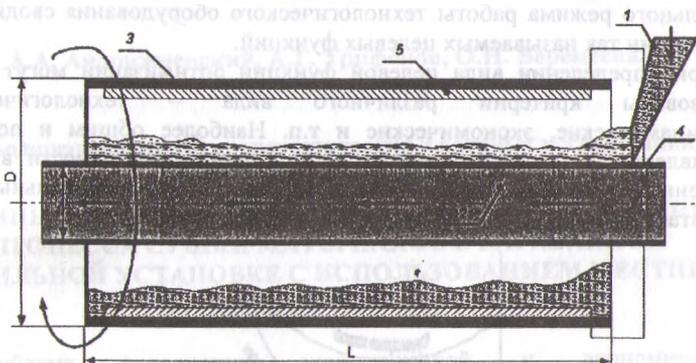


Рис. 2. Контактная барабанная сушилка непрямого действия. 1 – подача влажного материала; 2 – теплоноситель; 3 – вращающийся барабан; 4 – внутренняя труба; 5 – подъемно-лопастная насадка

Барабанный сушильный аппарат диаметром 1 м и длиной 5 м представляет собой наклонный цилиндрический барабан. Основные узлы сушилки: толка, 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 размерами 10x7 см, равномерно распределяющей материал по сечению барабана. Производительность сушилки 0,5 т песка в час. Песок поступает в сушилку с начальной влажностью 15 %, а конечная его влажность должна составлять не более 0,5 %. Температура песка на входе в зимнее время составляет около 10 °С.

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

входе в трубу составляет 800–1000 °С. При расходе около 30 кг топлива в час, образуется порядка 210 – 240 м<sup>3</sup>/ч дымовых газов.

Вычислительный алгоритм. Расчет процесса сушки в барабанных сушилках производится по методу, принятому для воздушных или газовых сушилок. При расчете определяются тепловые и гидравлические параметры всех элементов сушилки, удельное паронапряжение, а также число оборотов барабана и мощность, требующаяся для его вращения и для прокачки дымовых газов через трубу.

Расчет оптимального варианта целевой функции – минимальных экономических затрат – проводится в соответствии с блок-схемой. При запуске программы выполняется считывание исходных данных. Производится расчет теплоты, требуемой для испарения влаги из материала до заданной конечной влажности, и теплофизических свойств теплоносителя в зависимости от его температуры. Затем 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  $d_1$ . В первую очередь производится проверка значений на условие  $d_{2внутр} > d_{1наружн}$  и на условие заполнения высушиваемым материалом образовавшегося сечения барабана. Если условия соответствуют истине, то производится расчет безразмерных чисел Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля в трубе, иначе – целевой функции присваивается значение нуль. По значению чисел Рейнольдса определяется режим течения для каждой пары значений диаметра  $d_1$  и расхода  $G_{1tr}$ . В зависимости от режима с помощью условного оператора if выбирается формула для расчета коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и коэффициента сопротивления трения  $\zeta$  внутри трубы. В межтрубном пространстве  $\alpha$  вычисляется по приведенным зависимостям для дисперсного слоя высушиваемого материала согласно [2]. Далее производится расчет коэффициента теплопередачи  $k$ , требуемая поверхность теплообмена  $F$  и расчетная теплота  $Q_2$ . По вычисленным значениям теплоты происходит проверка условным оператором на условие  $Q \leq Q_2$ . Если условие не соблюдается, то целевая функция не имеет значения. Если же расчетные значения  $Q_2$  соответствуют требуемому значению, то производится расчет скорости потока и далее, после проверки на условие попадания рассчитанной скорости в область заданных предельных значений, – необходимой мощности на прокачку греющего теплоносителя и вращение барабана.

Затраты мощности на прокачку дымовых газов  $N$  определяются по уравнению

$$N = \left( \zeta_1 \cdot \frac{L}{d_1} \cdot \frac{\rho_1 \cdot u_1^2}{2} \right) \cdot \frac{G_{lvr}}{\rho_1}, \quad (2)$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления трению;  $L$  – длина трубы;  $\rho_1$  – плотность горячего теплоносителя;  $u_1$  – скорость горячего теплоносителя.

Мощность привода  $Nv$ , кВт, затрачиваемая на вращение барабана, определяется исходя из частоты вращения барабана  $n$ , об/с

$$Nv = 0.078L \cdot \rho_n \cdot n \cdot \gamma \cdot d_2^3, \quad (3)$$

где  $\rho_n$  – насыпная масса материала, кг/м<sup>3</sup>, для песка  $\rho_n = 1,25-1,56$  т/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – коэффициент, зависящий от вида насадки и степени заполнения барабана [4].

Затем производится расчет капитальных и эксплуатационных затрат. Результаты расчета 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.

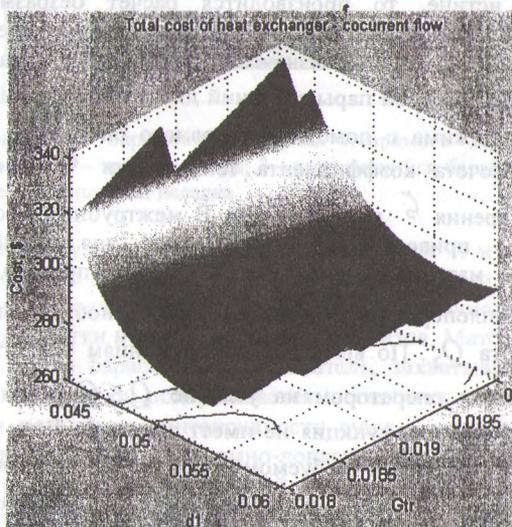


Рис. 3. Значения оптимальных параметров

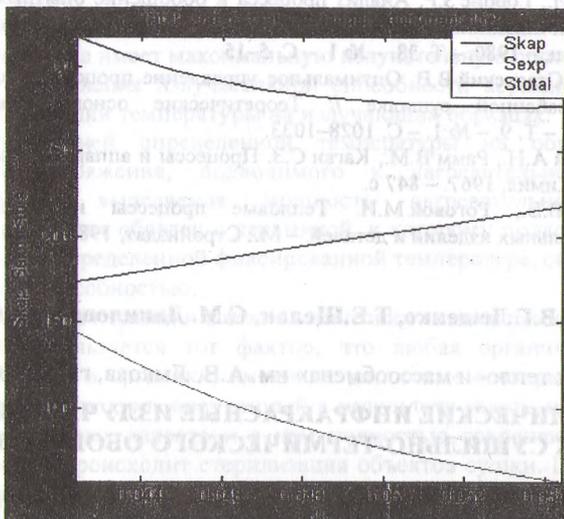


Рис. 4. График результатов расчета:  $S_{кар}$  – график капитальных затрат,  $S_{экп}$  – график эксплуатационных затрат,  $S_{тотал}$  – график суммарных затрат

В рабочем окне MATLAB после завершения расчетных циклов записываются значения минимума приведенных затрат  $f_m$ , \$/год и соответствующее ему значение диаметра внутренней трубы  $d_{опт}$ , м, и оптимального расхода дымовых газов  $G_{опт}$ , м<sup>3</sup>/ч, а также скорость дымовых газов  $u_{опт}$ , м/с при оптимальных значениях других параметров. На рисунках 3, 4 представлены результаты расчетов.

Приведенный программный комплекс, предназначенный для проведения оптимизационных расчетов при конструировании контактных барабанных сушильных установок, позволяет наглядно представить влияние технологических параметров моделируемого объекта на его оптимальные экономические показатели. Использование пакета MATLAB позволяет быстро и с высокой степенью точности рассчитать оптимизируемую целевую функцию.

Описанная программа оптимизации может быть использована специалистами при моделировании и оптимизации тепломассообменных процессов в технологических аппаратах различного типа. Предложенная методика проведения оптимизационных расчетов может быть распространена на более сложные типы сушильного теплообменного оборудования, а также на теплообменные системы.

#### Список литературы

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.

**В.Л.Драгун, В.Г.Лещенко, Т.Е.Щелак, С.М. Данилова-Третьяк**

«Институт тепло- и массообмена» им. А.В. Лыкова, г. Минск

## **БИОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ В РАЗРАБОТКАХ СУШИЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Настоящий доклад посвящен исследованиям и разработкам технологий сушки с использованием специальных керамических материалов в качестве преобразователей спектра инфракрасного излучения и сравнительной оценке эффективности установки на их основе по сравнению с традиционными.

Биокерамика – это продукт, сделанный из керамики, смешанной с оксидами минералов, такими, как оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и т.д. Биокерамика изготавливается более чем из 26 видов керамики с различными минеральными оксидами и нагревается до  $1600^\circ\text{C}$ . После остывания она становится способной к испусканию в дальней инфракрасной области.

В настоящее время получен ряд материалов, имеющих высокую излучательную способность в ИК-диапазоне.

Лучистая энергия, излучаемая керамикой, имеет качественно сложную спектральную характеристику. Количество излученной энергии с поверхности керамики зависит от условий, при которых происходят преобразования в самой керамике. У каждой керамики своя собственная оптимальная пропорция состава потому, что энергия, излучаемая керамикой, зависит от длин волн излучения, т.е. керамика обладает селективным излучением. Основой эффективного преобразования энергии являются оптимальные условия нанесения керамики на поверхность излучателей. Чем лучше условия передачи энергии от рабочей поверхности к керамике, структура, тем лучше эта энергия преобразуется в заданный ИК-спектр. Все керамики отличны по внутренней структуре, имеют различную плотность и дисперсность, обладают собственными, различными спектрами излучения, таким образом, они имеют различные