

# Оптимизационная термодинамика многоаппаратных систем

Сукин И.А

ИПС им. А.К. Айламазяна РАН

3 октября 2014 г.

# Термодинамика

- ▶ Феноменологическая наука
- ▶ Изучает поведение макросистем
- ▶ Близка к статистической физике
- ▶ Рассматривает явления как процессы преобразования энергии
- ▶ Позволяет рассматривать макросистемы как объекты управления

# Основные понятия термодинамики

- ▶ Координата и потенциал
  - ▶ Изменение координаты свидетельствует о протекании процесса
  - ▶ Разница потенциалов является движущей силой
- ▶ Экстенсивные и интенсивные переменные
  - ▶ Интенсивные переменные не изменяются при объединении двух идентичных подсистем
  - ▶ Экстенсивные переменные аддитивны
- ▶ Равновесие
  - ▶ Наступает если величины потенциалов каждого рода по объему системы равны
  - ▶ После протекания процесса система возвращается в состояние равновесия: релаксация

# Равновесные и неравновесные процессы

- ▶ Классическая термодинамика
  - ▶ Изучает равновесные процессы
  - ▶ Равновесные процессы могут быть обратимы
- ▶ Неравновесная термодинамика
  - ▶ Изучает неравновесные необратимые процессы
  - ▶ Разбивает систему на бесконечно малые равновесные элементы
- ▶ Оптимизационная термодинамика
  - ▶ Изучает неравновесные необратимые процессы
  - ▶ Разбивает систему на конечное число равновесных подсистем

# Оптимизационная термодинамика процессов

- ▶ Балансовые уравнения
  - ▶ Материальный баланс
  - ▶ Энергетический баланс
  - ▶ Энтропийный баланс
- ▶ В энтропийный баланс входит неотрицательное слагаемое  $\sigma$  — диссипация
- ▶ В реальности  $\sigma \neq 0$
- ▶ Условие  $\sigma \geq \sigma_{min}$  определяет область реализуемости

## Два типа процессов

- ▶ Производительность системы зависит от потока вырабатываемой механической, электрической мощности или мощности разделения, поток затрат представлен потоком тепла
  - ▶ Область реализуемости ограничена сверху
- ▶ Производительность определяется потоком теплоты, а затраты — механической или электрической мощностью или затратами тепла
  - ▶ Производительность монотонно возрастает с ростом затрат

# Оптимизационная термодинамика систем

- ▶ Реальные процессы многостадийны
- ▶ Оптимизационная термодинамика систем из нескольких аппаратов до сих пор не была разработана
- ▶ Множество технологических параметров системы отображается в меньшее множество характеристических коэффициентов

# Бинарная ректификация

- ▶ Граница области реализуемости без учета необратимости

$$g = bq$$

- ▶ Граница области реализуемости с учетом необратимости тепло- и массопереноса

$$g = bq - aq^2,$$

- ▶  $g, q$  — потоки
- ▶  $b, a$  — характеристические коэффициенты



# Тернарная ректификация

- ▶ Разделение на каскаде из двух колонн
- ▶ Два варианта разделения
- ▶  $b_{ij}$  — характеристические коэффициенты колонн
- ▶ Условия полной термодинамической согласованности

$$\frac{b_{11}^2(1 - x_0)}{a_{11}} = \frac{b_{12}^2}{a_{12}},$$

$$\frac{b_{21}^2(1 - x_2)}{a_{21}} = \frac{b_{22}^2}{a_{22}}$$

- ▶ Граница области реализуемости для одного из вариантов

$$g = \frac{b_{11}b_{12}}{b_{12} + b_{11}(1 - x_0)}(q_1 + q_2) - \frac{a_{11}b_{12}}{b_{12} + b_{11}(1 - x_0)}(q_1 + q_2)^2$$

- ▶ Параметризуется как

$$g = b^l q - a^l q^2$$

# Многокомпонентная ректификация

- ▶ Понятие о квазикомпонентах
- ▶ Можно представить как комбинацию бинарных и тернарных ректификаций
- ▶ Граница области реализуемости параметризуется как

$$g = bq - aq^2$$

- ▶ Можно аналитически найти оптимальный порядок разделения
- ▶ При невыполнении условий согласованности — численное решение

# Нетермическое разделение

- ▶ Мембраны и центрифуги
- ▶ Обратимая оценка мощности разделения

$$p^0 = -Rg_0 T \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i = bg_0.$$

- ▶ Необратимые затраты мощности разделения

$$\Delta p_j = \frac{g_0^2 T}{S_j} \left[ \left( \sum_{i=1}^{\nu} x_i \right)^2 d_{\nu+} + \left( \sum_{i=\nu+1}^n d_{(\nu+1)-} \right) \right]$$

- ▶ Итоговая мощность разделения

$$p = p^0 - \Delta p = bg_0 - ag_0^2$$

- ▶ Задача об оптимальном распределении поверхностей контакта

# Многопоточный теплообмен

- ▶ Суммарный коэффициент теплообмена  $\bar{\alpha}$ , суммарная тепловая нагрузка  $\bar{q}$
- ▶ Температуры греющих потоков на входе  $T_{i0}$ , водяные эквиваленты  $W_i$

$$\bar{\sigma}_{min} = \bar{\alpha} \frac{(1 - m)^2}{m},$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 1 - \frac{1}{\bar{\alpha}} \sum_{i=1}^k W_i (\ln T_{i0} - \ln \bar{T}), \\ \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^k T_{i0} W_i - \bar{q}}{\sum_{i=1}^k W_i}. \end{array} \right.$$

- ▶ Условие термодинамической реализуемости

$$\sum_{\nu=1}^M W_{\nu} \ln \frac{T_{\nu \text{ВХ}}}{T_{\nu \text{ВЫХ}}} \geq \bar{\sigma}_{min}.$$

# Результаты

- ▶ Множество технологических параметров многокомпонентной системы может быть сведено к меньшему множеству характеристических коэффициентов
- ▶ Одиночные аппараты разделены на два типа в зависимости от вида границы области реализуемости
- ▶ Одиночные аппараты могут произвольным образом комбинироваться
- ▶ Результаты могут быть использованы для создания общей теории оптимизационной термодинамики многоаппаратных систем