

УДК 66.01.011

ИНФОРМАЦИОННО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА БИНАРНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

© 2019 г. В. А. Налетов¹, В. А. Колесников¹, М. Б. Глебов¹, А. Ю. Налетов¹, *

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

*E-mail: energo@muctr.ru

Поступила в редакцию 12.10.2018 г.

После доработки 26.10.2018 г.

Принята к публикации 08.11.2018 г.

Представлен системный подход к оптимальной организации процесса бинарной ректификации с позиции теории информации, позволяющий сформулировать условия по оптимальной дифференциации функций сложного процесса при разделении потока сырья на потоки продуктов. Проведено сравнение результатов вычислительных экспериментов на основе данного подхода и известных термодинамических подходов по минимизации потерь эксергии и производства энтропии на численном примере разделения смеси метанол–вода. Показано, что результаты вычислительных экспериментов на основе информационно-вероятностного подхода к оптимальной организации процесса бинарной ректификации согласуются с результатами на основе термодинамических подходов, что доказывает применимость информационного подхода в контексте его интеграции в общий алгоритм проектирования химико-технологических систем на основе информационной концепции.

Ключевые слова: ректификация, организация, энтропия информации, статистический вес, дифференциация функций, потери эксергии, производство энтропии

DOI: 10.1134/S004035711902012X

ВВЕДЕНИЕ

Задачи оптимизации и синтеза химико-технологических систем (ХТС), предполагающие выбор оптимального технического решения, являются наиболее сложным этапом автоматизированного проектирования. Методология автоматизированного проектирования химических производств представлена в работе [1]. Как правило, этапу синтеза предшествует этап анализа, основной целью которого является связь управляющих параметров с общим критерием посредством математической модели. При этом анализ систем усложняется в случае наличия процессов разделения исходных веществ по потокам продуктов или отборам, в силу чего ХТС становятся “многомаршрутными”, что приводит к усложнению их топологии.

В литературе [2] термин “организация” определен как многосмысловой термин, используемый различными дисциплинами системного анализа. С одной стороны, организация понимается как внутренняя упорядоченность, согласованность, взаимодействие автономных частей целого, ориентированного на определенную предназначенность, т.е. организация как структура, а с другой – это совокупность процессов, ведущих к образованию и развитию взаимосвязей между частями целого (объекта), т.е. организация как про-

цесс. Для оценки организации технологических процессов применяются методы теории информации. Например, в работах В.П. Майкова [3] для моделирования процессов химической технологии было использовано понятие информационной энтропии как меры неопределенности, выражение которой было адекватно термодинамической энтропии, выраженной через мольные расходы и концентрации веществ. При этом классическим математическим моделям В.П. Майков противопоставляет в качестве альтернативы формализм статистической механики Э.Т. Джейнса, описывающий поведение произвольных статистических ансамблей. Совершенно иное использование информационного подхода представлено в работах школы В.В. Кафарова, идеи которой развиты в настоящей статье. Если в работах В.П. Майкова информационная энтропия характеризовала неопределенность или неупорядоченность и являлась функцией состояния, то в работах [4–7] в качестве характеристики организации технологического объекта использовалась энтропия информации как мера организованности или порядка, которая является функцией процесса преобразования информации.

При этом общие постулаты информационно-вероятностного подхода, сформулированные в

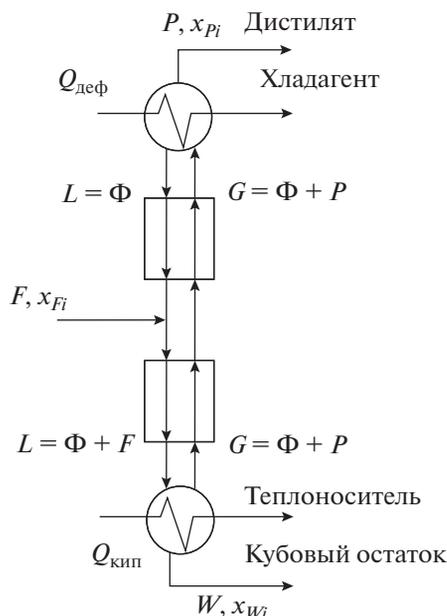


Рис. 1. Принципиальная схема ректификации бинарной смеси.

предшествующих работах и используемые в настоящей статье, сводились к следующим.

1. Каждый технологический поток является носителем информации о его возможных состояниях (возможных результатах технологического процесса) и поэтому может рассматриваться как информационный поток. При этом возможные состояния потока представляются на основе корпускулярной и квантовой теорий о дискретности превращений вещества и энергии.

2. Характеристикой информационного потока является энтропия информации, выраженная через вероятности возможных состояний технологического потока.

3. Ансамбль возможных состояний технологического потока характеризует объем информационного процесса, который опосредованно определяется альтернативными способами его организации, в силу чего данные возможные состояния являются статистически независимыми.

4. Для оценки вероятностей возможных состояний технологического потока используется распределение Больцмана, которое моделирует статистическое распределение идеального газа.

5. Преобразованию информационных потоков в аппарате ставится в соответствие решение некоторой информационной задачи, заключающейся в выборе определенного исхода из возможных альтернатив путем уменьшения исходной неупорядоченности при условии постоянства полной или внутренней энергии преобразования, т.е. при условии изоэнергетичности, что адекватно пред-

ставлению объекта как замкнутой термодинамической системы.

Целью настоящей работы является вывод с использованием общих постулатов информационно-вероятностного подхода условий оптимальной организации процесса бинарной ректификации и сравнительный анализ полученных результатов с использованием информационного и термодинамических подходов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В процессе бинарной ректификации исходный поток питания в колонне разделяется на два продукта: низкокипящий – дистиллят и высококипящий – кубовый остаток. Для простоты проведем анализ различных подходов к оптимальной организации двухсекционной колонны в стационарном режиме при разделении двухкомпонентной смеси, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

С целью сопоставимости полученных результатов, принятые в работе допущения, в основном, повторяют аналогичные предпосылки, представленные в работе [8]:

поток питания – жидкость при температуре кипения;

дефлегматор (конденсатор) – полный;

массообмен – эквимольный;

эффекты перемешивания между соседними сечениями пренебрежимо малы;

поток питания подается при температуре кипения в то сечение колонны, состав жидкости в котором наиболее близок составу питания.

Уравнения материального баланса для колонны на рис. 1 можно представить следующим образом:

$$F = P + W, \quad (1)$$

$$Px_{Pi} + Wx_{Wi} = Fx_{Fi}. \quad (2)$$

Для вывода условий оптимальной дифференциации функций процесса бинарной ректификации сначала формализуем объект исследования и представим его с позиции теории информации. Поскольку в процессе бинарной ректификации исходный поток разделяется на два, то мы имеем дело с дифференциацией (распределением) функций сложного процесса между потоками продуктов.

В работе [7] была рассмотрена информационная модель при дифференциации функций системы между элементами и подсистемами, и был сделан вывод, что характеристикой, описывающей возможные состояния потоков при дифференциации функций системы, является энтропия информации Шеннона, выраженная через статистические веса элементов или подсистем, которые связаны с вероятностью обратной зависимостью.

Собственно выражение статистического веса можно представить как

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta Z^{p,T} - \Delta U}{R_v T_0}\right), \quad (3)$$

где $\Delta Z^{p,T}$, ΔU – изменения потенциалов Гиббса и внутренней энергии соответственно в процессе преобразования потока питания в потоки дистиллята и кубового остатка, Дж/моль; R_v – мольная газовая постоянная; T_0 – температура окружающей среды, К.

Из выражения (3) следует, что величина статистического веса всегда больше единицы, в силу того что выражение под знаком экспоненты положительно и не равно нулю, поскольку равенство нулю означало бы отсутствие процесса как такового.

На рис. 2 представлен процесс бинарной ректификации на основе информационно-вероятностного подхода.

Как следует из рис. 2, информационная система, отображающая процесс бинарной ректификации, распределяет потоки информации между двумя подсистемами.

Задача организации процесса сводится к выбору оптимального варианта согласования двух взаимодействующих друг с другом подсистем, находящихся в рамках замкнутой термодинамической системы в силу условия изоэнергетичности преобразования информации.

Математически задача организации процесса сводится к максимизации энтропии информации системы с учетом ограничений типа равенств, учитывающих связь входной и выходной энтропий информации. Поиск условий оптимальной организации процесса можно осуществить на основании метода неопределенных множителей Лагранжа. Для этого определим функцию Лагранжа, в которую войдут исходный критерий и уравнения с множителями Лагранжа, полученные из ограничений.

Энтропия информации процесса как сложной системы равна

$$H = H_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Система ограничений типа равенств для системы, представленной на рис. 2, имеет следующий вид:

$$H_{\text{вых } P,W} = h_{\text{вых } P,W}(H_{\text{вх}}; u). \quad (5)$$

Выражение для функции Лагранжа с учетом (4) и (5) по каждому потоку продукта будет равно

$$L_{P,W} = H_{\text{вх}} + \lambda_{P,W} [H_{\text{вых } P,W} - h_{\text{вых } P,W}(H_{\text{вх}}; u)]. \quad (6)$$

Соответственно вычислим производные каждого из выражений (6) по входной энтропии:

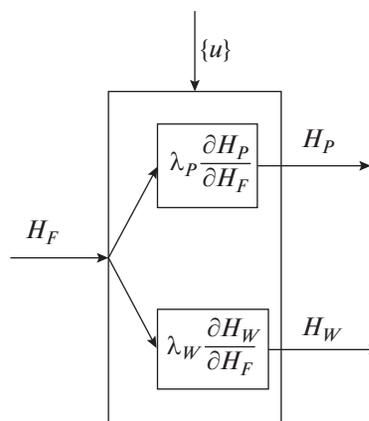


Рис. 2. Структура информационных потоков в простой колонне ректификации: H_F – энтропия информации на входе (питание); $H_{P(W)}$ – энтропия информации на выходе (потоки продуктов: дистиллята и кубового остатка соответственно); $\{u\}$ – управляющие воздействия; $\lambda_{P,W}$ – безразмерные множители (множители Лагранжа).

$$\frac{\partial L_{P,W}}{\partial H_{\text{вх}}} = 1 - \lambda_{P,W} \frac{\partial h_{\text{вых } P,W}}{\partial H_{\text{вх}}}. \quad (7)$$

С учетом представленных в работе [7] выражений, что $h_{\text{вых } P,W} = H_{\text{вх}} \eta_T / K_{P,W}$, имеем

$$\lambda_{P,W} = \frac{K_{P,W}}{\eta_T}, \quad (8)$$

где η_T – термодинамический КПД, $K_{P,W}$ – статистические веса по потокам продуктов (факторы затрат на организацию процесса).

По физическому смыслу полученные множители Лагранжа согласно (8) аналогичны таковым в эксергоэкономическом подходе. В частности, множители Лагранжа в задаче оптимизации с позиции эксергоэкономики имели смысл стоимости единицы эксергии потоков продуктов. Постулируя аналогию содержания, можно принять, что множители Лагранжа в задаче оптимальной организации в информационном подходе также имеют смысл “стоимости” (безразмерная величина) единицы информации потоков продуктов. Изменяется только мера стоимости. За единицу стоимости в информационном подходе принимается условная элементарная упорядочивающая операция в зависимости от специфики процесса. По физическому смыслу стоимости единицы эксергии или единицы информации должны быть минимизированы в силу необходимости повышения рентабельности технологий. Принимая во внимание, что $K = K_P K_W$, получим

$$\lambda_P = \frac{K_P}{\eta_T} \text{ и } \lambda_W = \frac{K}{\eta_T K_P}. \quad (9)$$

Поиск оптимального значения критериев (9) по каждому из потоков продуктов возможно осуществить на основании необходимого условия экстремума по фактору затрат (например, для потока продукта P), а именно

$$\frac{\partial \lambda_{P,W}}{\partial K_P} = 0 \text{ и } \frac{\partial \lambda_P}{\partial K_P} + \frac{\partial \lambda_W}{\partial K_P} = 0. \quad (10)$$

Подставляя выражения (9) в производные, получим

$$K_P = \sqrt{K} \text{ или } K_P = K_W, \quad (11)$$

т.е. условие экстремума равносильно равенству факторов затрат или статистических весов по потокам продуктов.

Можно показать, что условие (11) является следствием фундаментального закона – нулевого начала термодинамики, основанного на термодинамике взаимодействия подсистем при статистическом их описании. Для этого рассмотрим взаимодействие двух произвольных подсистем 1 и 2, разделенных подвижной перегородкой, способной проводить теплоту, в рамках замкнутой термодинамической системы при условии постоянства ее объема и внутренней энергии.

Обе подсистемы, взаимодействуя друг с другом, могут обмениваться теплотой и работой до момента установления равновесия, которое характеризуется максимумом энтропии системы, аддитивно включающей энтропии подсистем [9]. При этом энтропия системы равна

$$S_c = S_1 + S_2 = \ln K_1 + \ln K_2, \quad (12)$$

где K_1 и K_2 – статистические веса подсистем.

Ограничения представляются следующим образом:

$$\begin{cases} V_c = V_1 + V_2 = \text{const} \\ U_c = U_1 + U_2 = \text{const} \end{cases} \quad (13)$$

Условие равновесия соответствует равенству нулю полного дифференциала энтропии системы:

$$dS_c = d \ln K_1 + d \ln K_2 = 0. \quad (14)$$

При выводе условия равновесия подсистем следует учесть, что статистические веса подсистем являются функцией их внутренней энергии и объема, поскольку именно эти два параметра изменяются в ходе взаимодействия подсистем. Запишем выражение для статистического веса, например, для подсистемы 1:

$$d \ln K_1 = \left(\frac{\partial \ln K_1}{\partial V_1} \right) dV_1 + \left(\frac{\partial \ln K_1}{\partial U_1} \right) dU_1. \quad (15)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial \ln K_1}{\partial V_1} = \frac{p_1}{RT_1} \text{ и } \frac{\partial \ln K_1}{\partial U_1} = \frac{1}{RT_1},$$

где p_1 – среднее давление в подсистеме 1, получим

$$d \ln K_1 = \frac{p_1}{RT_1} dV_1 + \frac{1}{RT_1} dU_1. \quad (16)$$

Из ограничений (13) следует, что

$$dV_1 = -dV_2 \text{ и } dU_1 = -dU_2. \quad (17)$$

Тогда условие равновесия в системе можно записать в виде

$$dS_c = \left(\frac{p_1}{RT_1} - \frac{p_2}{RT_2} \right) dV_1 + \left(\frac{1}{RT_1} - \frac{1}{RT_2} \right) dU_1 = 0. \quad (18)$$

Принимая во внимание, что $dV_1 \neq 0$ и $dU_1 \neq 0$, окончательно имеем

$$p_1 = p_2 \text{ и } T_1 = T_2,$$

что равносильно равенству статистических весов подсистем $K_1 = K_2$.

Таким образом, оптимальное согласование или оптимальная дифференциация функций системы между подсистемами с точки зрения термодинамики означает, что при условии постоянства ее полной энергии максимизация энтропии (определяет “связанную” форму энергии в терминологии Гиббса–Гельмгольца) компенсируется уменьшением свободной энергии, т.е. те же технологические операции выполняются при минимуме притоков свободной энергии в систему извне.

С учетом необходимости масштабирования потенциалов в выражении (3) представим верхнюю и нижнюю части колоны ректификации в удельных мольных расходах как показано на рис. 3.

Сопоставляя рис. 1 и 3, имеем $P/F = \varepsilon$ – мольная доля потока дистиллята; $W/F = 1 - \varepsilon$ – мольная доля потока кубового остатка; $R = \Phi/P$ – флегмовое число.

Принимая мольный поток питания равным единице, получим

$$P = \varepsilon; \quad W = 1 - \varepsilon; \quad G = \varepsilon R + \varepsilon; \quad L = \varepsilon R + 1.$$

Тогда общие выражения для статистических весов или факторов затрат имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} K_P &= \exp \left[\varepsilon \sum_{i=1}^m x_{Pi} \ln x_{Pi} - (\varepsilon R + \varepsilon) \sum_{i=1}^m y_{Fi} \ln y_{Fi} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\varepsilon R + \varepsilon) C_{pF}^{sg}(y_F) T_F - \varepsilon C_{pP}^l(x_P) T_P}{R_v T_0} \right] \\ K_W &= \exp \left[(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^m x_{Wi} \ln x_{Wi} - (\varepsilon R + 1) \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_{i=1}^m x_{Fi} \ln x_{Fi} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1 - \varepsilon) C_{pW}^l(x_W) T_W - (\varepsilon R + 1) C_{pF}^l(x_F) T_F}{R_v T_0} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

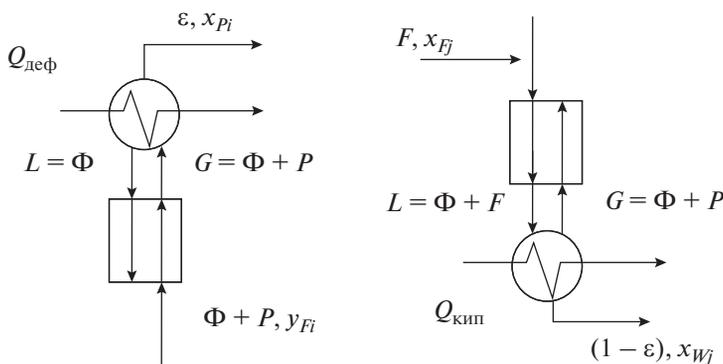


Рис. 3. К расчету фактора затрат по продуктам.

Принимая во внимание, что нулевое начало термодинамики устанавливает направление поиска оптимального решения и его теоретический (не достижимый в процессе ректификации) предел, можно сформулировать критерий в задаче оптимальной организации как минимизация разности факторов затрат согласно (19) по потокам продуктов $\Delta K = K_p - K_w$ (по абсолютной величине).

В дальнейшем на численном примере будет показано, что имеется корреляция между тепловыми нагрузками на дефлегматор и кипятильник и значением общего фактора затрат на организацию процесса бинарной ректификации. Для сравнения результатов с применением условий (19) представим традиционные термодинамические подходы к оптимальной организации процесса бинарной ректификации.

Один из таких подходов связан с минимизацией потерь эксергии в системе, которые возможно определить непосредственно из эксергетического баланса или из баланса термодинамической энтропии [10].

Запишем, в частности, баланс энтропии для колонны ректификации с кипятильником и дефлегматором:

$$FS_F + \frac{Q_{кип}}{T_w} + \Delta S_n = PS_P + WS_W + \frac{Q_{деф}}{T_p}, \quad (20)$$

или в приведенном к удельным мольным расходам виде

$$S_F + \frac{\bar{Q}_{кип}}{T_w} + \Delta S_n = \varepsilon S_p + (1 - \varepsilon) S_w + \frac{\bar{Q}_{деф}}{T_p}, \quad (21)$$

где $S_F, S_p, S_w, \Delta S_n, \bar{Q}_{деф}, \bar{Q}_{кип}, T_w, T_p$ – энтропия потоков питания, дистиллята и кубового остатка соответственно, необратимое увеличение энтропии, удельные количества теплоты в дефлегматоре и кубе соответственно и температуры потоков кубового остатка и дистиллята соответственно.

Из выражения (21) можно определить необратимые потери в системе, представленной колонной ректификации, кипятильником и дефлегматором:

$$\Delta S_n = \varepsilon S_p + (1 - \varepsilon) S_w + \frac{\bar{Q}_{деф}}{T_p} - S_F - \frac{\bar{Q}_{кип}}{T_w}. \quad (22)$$

Согласно уравнению Гюи–Стодолы потери эксергии выражаются произведением величины необратимых потерь на температуру окружающей среды следующим образом:

$$\Delta E_n = T_0 \Delta S_n. \quad (23)$$

Задача оптимальной организации системы с колонной ректификации, кипятильником и дефлегматором в соответствии с данным подходом сводится к минимизации потерь эксергии согласно (23) или необратимых потерь энтропии согласно (22).

Другой подход к оптимальной организации системы с колонной ректификации основан на минимизации производства энтропии. Рассмотрим систему в стационарном состоянии и в неравновесных условиях, вызванных потоками вещества и энергии. Производство энтропии при обмене подсистем веществом и энергией в этом случае равно скалярному произведению вектора потоков на вектор движущих сил [11]. В работе [8] для данного случая приведены выражения для расчета производства термодинамической энтропии для процесса бинарной ректификации.

В частности, производство энтропии определяется следующей зависимостью:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_\mu, \quad (24)$$

где σ_T и σ_μ – производство энтропии в процессах теплообмена и массообмена соответственно.

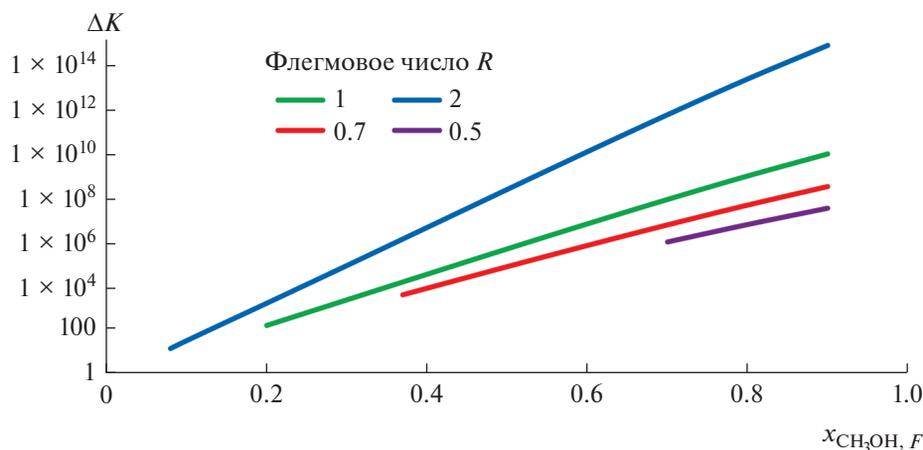


Рис. 4. Изменение разности факторов затрат в логарифмических координатах при различных значениях флегмового числа и содержания метанола в питании.

При этом производство энтропии в процессе теплообмена равно [8]

$$\sigma_T = \bar{Q}_{\text{кип}} \left[\frac{1}{T_W} - \frac{1}{T_+} \right] + \bar{Q}_{\text{деф}} \left[\frac{1}{T_-} - \frac{1}{T_P} \right], \quad (25)$$

где T_+ , T_- – температуры теплового источника в кипятильнике и хладагента в дефлегматоре соответственно, выбранные с учетом минимальной разности температур в теплообменниках.

Производство энтропии в процессе массообмена вычисляется следующим образом [8]:

$$\sigma_\mu = R_v \int_{x_W}^{x_P} G(y^*, y) \ln \frac{y^*(1-y)}{y(1-y^*)} dx. \quad (26)$$

С учетом ранее введенных обозначений для удельных расходов получим

$$\sigma_\mu = R_v \int_{x_W}^{x_P} (\varepsilon R + \varepsilon)(y - y^*) \ln \frac{y^*(1-y)}{y(1-y^*)} dx, \quad (27)$$

где G – расход пара, моль/с; y , y^* – соответственно текущая и равновесная концентрация вещества в паре. В силу принятых допущений производством энтропии при смешении флегмы с потоком питания можно пренебречь. Проиллюстрируем представленные подходы к оптимальной организации на примере простой колонны ректификации двухкомпонентной смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим численный пример разделения смеси метанол–вода и дадим оценку полученных результатов с позиции представленных подходов.

Расчет производился на основе следующих предпосылок:

расчет ведется от тарелки к тарелке;
тарелки – теоретические (эффективность равна 1);
дефлегматор (конденсатор) – полный;
поток питания – насыщенная жидкость.

Исходные данные для расчета были приняты следующими: расход питания (исходная смесь) 0.01 кмоль/с, состав дистиллята по метанолу $x_P = 0.99$, давление в процессе 0.1 МПа.

Для проведения сравнительного анализа на основе информационного и термодинамического подходов расчеты проводились в пределах математической реализуемости в широком диапазоне варьирования следующих характеристик:

- состав питания;
- флегмовое число;
- число тарелок;
- положение тарелки питания;
- количества продуктов.

На рис. 4–6 представлены изменения разности факторов затрат ΔK в логарифмических координатах, потеря эксергии и производства энтропии в системе с колонной ректификации, кипятильником и дефлегматором.

Для оценки вклада составляющих в выражении производства энтропии на рис. 7 представлено производство энтропии только от процесса массообмена согласно (27).

Из сравнения данных, приведенных на рис. 6 и 7, следует, что общее производство энтропии в системе определяется в основном процессами теплообмена.

Характер зависимостей, представленных на рис. 4–7 и реализующих различные подходы к оптимальной организации процесса бинарной ректификации, свидетельствует об их идентичном

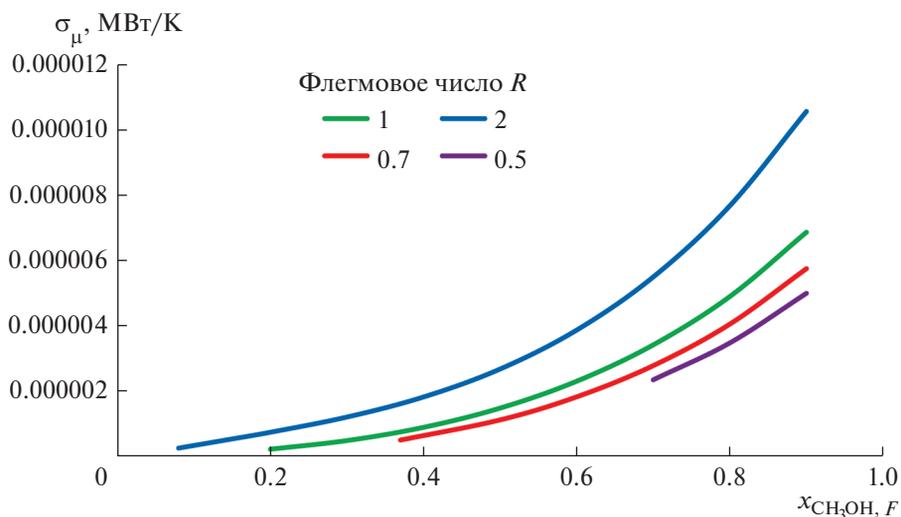


Рис. 5. Изменение потерь эксергии в системе при различных значениях флегмового числа и содержания метанола в питании.

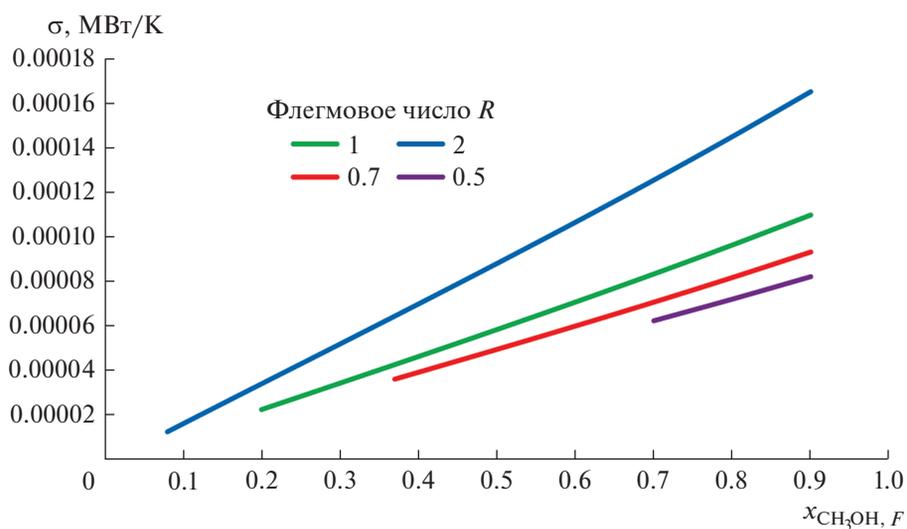


Рис. 6. Изменение производства энтропии в системе при различных значениях флегмового числа и содержания метанола в питании.

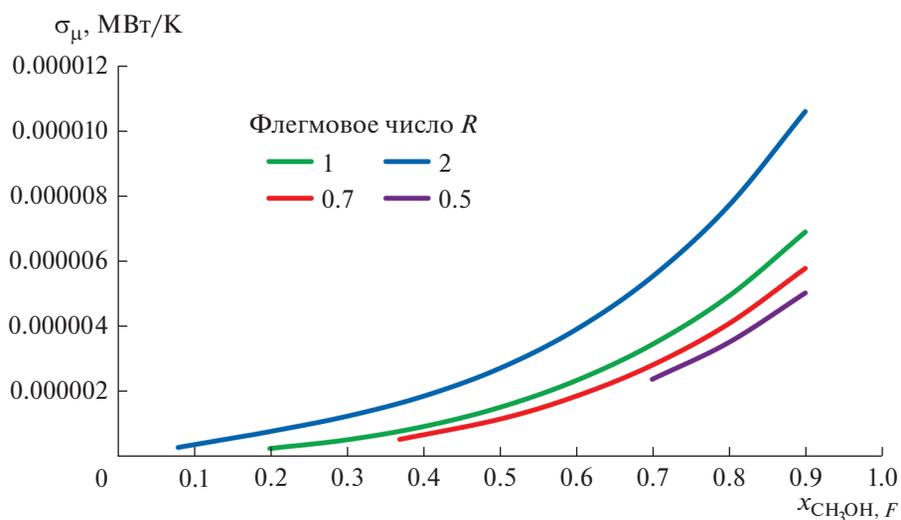


Рис. 7. Изменение производства энтропии в процессе массообмена при различных значениях флегмового числа и содержания метанола в питании.

Таблица 1. Сравнение критериев для заданного состава питания при изменении флегмового числа

№ п/п	Характеристики							
	R	N	$Q_{\text{деф}}$	$Q_{\text{кип}}$	$\ln K_P + \ln K_W$	$\ln K_P - \ln K_W$	ΔS_H	σ
1	0.7	25	0.2206	0.2275	9.1663	7.0926	5.60×10^{-5}	3.651×10^{-5}
2	1	13	0.2812	0.2879	11.8306	9.7322	7.23×10^{-5}	4.662×10^{-5}
3	2	10	0.4218	0.4285	18.1257	12.2297	0.000111	7.016×10^{-5}

Примечание. В таблице сумма логарифмов от факторов затрат по потокам продуктов равна логарифму общего фактора затрат для колонны, а разность логарифмов от факторов затрат по потокам продуктов равна логарифму их отношения, которое в задаче оптимизации стремится к единице.

характере во всем диапазоне варьирования характеристик, что говорит о непротиворечивости выводов на основании информационного и термодинамических подходов к оптимальной организации процесса.

Рассмотрим часто встречающийся на практике случай, когда состав питания смеси, в данном случае, метанол–вода задан и соответствует содержанию метанола в питании, равному 0.4.

В табл. 1 приведены результаты расчета критериев для разделения смеси метанол–вода при варьировании флегмового числа в колонне.

Минимальному общему фактору затрат, минимальной разности логарифмов от факторов затрат по потокам целевых продуктов, минимальным потерям эксергии, а также минимальному производству энтропии соответствует минимальное флегмовое число, минимальные тепловые нагрузки на кипятильник и дефлегматор, но максимальное число теоретических тарелок. Данные сравнительного анализа результатов вычислительных экспериментов строго коррелируются. При этом информационный критерий оптимальной организации процесса в силу экспоненциального его характера является более чувствительным по сравнению с термодинамическими критериями в задачах оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный информационно-вероятностный подход к оптимальной организации процесса бинарной ректификации приводит к условиям сближения факторов затрат или статистических весов по потокам продуктов, что является следствием нулевого начала термодинамики. При этом выводы, полученные на основании вычислительных экспериментов для процесса бинарной ректификации с использованием различных подходов, приводят к непротиворечивым результатам. Общим выводом для рассматриваемых подходов является то, что оптимальная организация процесса бинарной ректификации определяется в основном градиентом температур между кипятильником (источником) и дефлегматором (стоком) и

соответствующими тепловыми нагрузками на эти элементы и в меньшей степени капитальными затратами (увеличение количества тарелок). Полученные результаты подтверждают обоснованность идеи об организации сложного процесса путем оптимальной дифференциации его функций между потоками продуктов или отборами в соответствии с постулатами информационного подхода. Целесообразность применения информационного подхода как альтернативы термодинамическим подходам к оптимальной организации процесса мотивирована возможностью выработки единой методологии проектирования неоднородных ХТС в процессе их элементного усложнения, в том числе в части оптимальной дифференциации функций сложного процесса между потоками продуктов или отборами.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C_p	теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(моль К)
$\Delta E_{\text{п}}$	потери эксергии, Дж/моль
F	расход питания, моль/с
G	расход пара, моль/с
H	энтропия информации
h	функция информационного процесса
K	статистический вес (фактор затрат)
ΔK	разность факторов затрат
L	функция Лагранжа; расход жидкости, моль/с
t	число компонентов в смеси
N	число тарелок
P	расход дистиллята, моль/с
p	давление, МПа
Q	количество теплоты (тепловая нагрузка), МВт
\bar{Q}	удельное количество теплоты, МВт/моль
R	флегмовое число
R_v	универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К)
S	термодинамическая энтропия, Дж/(моль К)

ΔS_n	необратимое увеличение энтропии, Дж/(моль К)
T	температура, К
ΔU	изменение внутренней энергии в процессе, Дж/моль
u	произвольный управляющий параметр
W	расход кубового остатка, моль/с
x	концентрация вещества в жидкости, мол. д.
y	концентрация вещества в паре, мол. д.
ΔZ	изменение изобарно-изотермического потенциала в процессе, Дж/моль
ε	мольная доля потока дистиллята
η	КПД процесса
λ	безразмерный множитель Лагранжа, имеет смысл стоимости единицы информации потоков продуктов
σ	общее производство энтропии, МВт/К
σ_μ	производство энтропии в процессах массообмена, МВт/К
σ_T	производство энтропии в процессах теплообмена, МВт/К
Φ	расход потока флегмы, моль/с

ИНДЕКСЫ

*	равновесная концентрация
“—”	тепловой сток
“+”	тепловой источник
0	окружающая среда
F	питание
g	поток пара
i	индекс компонента в смеси
l	поток жидкости
P	дистиллят
T	термодинамический
W	кубовый остаток

вх	значение на входе
вых	значение на выходе
деф	дефлегматор
кип	кипятильник
с	система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л.* Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Химия, 1973.
2. *Подлесных В.И.* Теория организации. СПб.: Бизнес-пресса, 2003.
3. Энтропийные методы моделирования в химической технике / Под ред. Майкова В.П. М.: Моск. ин-т хим. машиностр., 1980.
4. *Кафаров В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. 3-е изд. М.: Химия, 1976.
5. *Кафаров В.В., Перов В.Л., Бобров Д.А., Налетов А.Ю.* Анализ химико-технологических процессов на основе принципов теории информации // Докл. АН СССР. 1977. Т. 232. № 3. С. 663.
6. *Кафаров В.В., Перов В.Л., Бобров Д.А., Налетов А.Ю.* Информационный критерий совершенства химико-технологической системы // Докл. АН СССР. 1977. Т. 236. № 2. С. 404.
7. *Naletov V.A., Gordeev L.S., Glebov M.B., Naletov A.Yu.* Information-Thermodynamic Principle of the Organization of Chemical Engineering Systems // Theor. Found. Chem. Eng. 2011. V. 45. № 5. P. 631. [*Налетов В.А., Гордеев Л.С., Глебов М.Б., Налетов А.Ю.* Информационно-термодинамический принцип организации химико-технологических систем // Теорет. основы хим. технологии. 2011. Т. 45. № 5. С. 541.]
8. *Цирлин А.М., Романова Т.С., Григорьевский И.Н.* Оптимальная организация процесса бинарной ректификации // Теорет. основы хим. технологии. 2008. Т. 42. № 4. С. 435.
9. *Рейф Ф.* Статистическая физика. Берклеевский курс физики. М.: Наука, 1977.
10. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. М.: Энергия, 1968.
11. *Пригожин И., Конденуди Д.* Современная термодинамика. М.: Мир, 2002.