

¹Аспирант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології Українського державного хіміко-технологічного університету, Дніпр, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології Українського державного хіміко-технологічного університету, Дніпр, Україна

СТАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕКТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВИЖНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Актуальность. Решена актуальная задача многокритериальной статической оптимизации процессов ректификации с использованием подвижных управляющих воздействий, которые заключаются в изменении места ввода сырья в колонну, а также исследована эффективность их использования при различных статических режимах процесса.

Цель работы – повышение производительности процесса ректификации и снижение энергетических затрат на его ведение путем использования при управлении процессом подвижных управляющих воздействий и многокритериального подхода к расчету их оптимальных величин.

Метод. Предложены методы расчета оптимальной тарелки питания совместно с расчетами оптимальных величин традиционных управляющих воздействий – расхода пара в куб колонны и выхода целевого продукта – на основании критериев максимизации производительности и минимизации энергозатрат с использованием нормализованного критерия оптимизации. Расчеты проводятся с использованием нелинейной математической модели процесса, описывающей процессы тепло- и массообмена на каждом контактном устройстве установки. Расчет оптимальной точки на границе рабочей области ректификационной колонны в координатах традиционных управляющих воздействий предложено вести методом секущих. Так как величина искомого подвижного управляющего воздействия может принимать только дискретные, целочисленные значения, то для решения оптимизационной задачи предложен метод сканирования.

Результаты. Разработанный оптимизационный метод использовался для расчетов оптимальных статических режимов ректификационной колонны для разделения смеси метанол-вода при изменении значений параметров модели в широких пределах. Доказана экстремальная зависимость от величины подвижного управляющего воздействия как частных критериев, так и нормализованного критерия оптимизации. Результаты моделирования показали, что достигаемое использованием подвижных управляющих воздействий повышение производительности составляет 1–5% при экономии тепла в кубе колонны на 6–8%.

Выводы. Проведенные исследования доказали эффективность многокритериального подхода к решению задачи статической оптимизации процессов ректификации с использованием подвижных управляющих воздействий, что позволяет использовать его на практике. Предложенные методы статической оптимизации применимы для процессов многокомпонентной, сложной ректификации. Дальнейшие исследования в данном направлении заключаются в разработке методов и алгоритмов статической оптимизации процессов ректификации с использованием непрерывных подвижных управляющих воздействий, подвижных воздействий с двумя степенями свободы, в моделировании переходных процессов в ректификационных колоннах при подвижном управлении.

Ключевые слова: процесс ректификации, подвижное управление, многокритериальная статическая оптимизация.

НОМЕНКЛАТУРА

D – мольный расход дистиллята, кмоль/ч;
 F – мольный расход питания, кмоль/ч;
 L – мольный расход жидкой фазы, кмоль/ч;
 N_f – номер тарелки питания;
 P – давление, МПа;
 Q – расход тепла, кДж/ч;
 t – температура, °С;
 V – мольный расход паровой фазы, кмоль/ч;
 x – мольная концентрация компонента в жидкой фазе, кмоль/кмоль;
 y – мольная концентрация компонента в паровой фазе, кмоль/кмоль;
 β – коэффициент массоотдачи, кмоль/(м²·ч);
 ε – точность расчетов;
 η – эффективность контактного устройства по Мерфри;
 λ – нормализованный критерий оптимизации;
 Нижние индексы:
 d, D – параметры дистиллята;
 f – параметры питания;
 fl – параметры флегмы;
 i – рассматриваемый компонент смеси;

j – рассматриваемая тарелка;
 \min, \max – граничные условия;
 nz – целевой компонент смеси;
 opt – оптимальные условия;
 Q – расход тепла;
 w – параметры кубового остатка;
 $t_{кип}$ – температура кипения.

ВВЕДЕНИЕ

Значительное число технологических схем во многих отраслях промышленности включают в себя процесс ректификации, использующийся для разделения однородных жидких смесей на различных стадиях переработки сырья. Несмотря на многие особенности и сложности, связанные с управлением данным процессом, широкое распространение ректификации подчеркивает её незаменимость в настоящее время.

Большинство научных работ, исследующих как технологические основы, так и подходы к автоматическому управлению ректификационными аппаратами, направлено на снижение значительных энергозатрат, необходимых для осуществления процесса разделения [1]. Необходимость обеспечения непрерывного парового потока в колонне ставит эксплуатационные затраты определяющими перед капитальными, а, значит, особенно важно

внедрение систем автоматического управления, которые позволяют вести процессы ректификации оптимальным образом.

Однако оптимальное управление ректификационной колонной представляет собой сложную инженерную задачу вследствие большого числа регулируемых параметров, их взаимосвязи и распределенности в пространственной области аппарата, а также значительного времени запаздывания и инерционности каналов управления. Аналитическое описание динамики процесса в общем случае состоит из нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, общее число которых может составлять несколько тысяч. С другой стороны, высокая инерционность ректификационных колонн позволяет отказаться от описания динамики процесса в пользу более простых статических моделей, и именно статическая оптимизация дает основную составляющую экономического эффекта от внедрения систем управления [2].

Названные особенности ректификационных установок как объектов управления обуславливают актуальность задачи статической оптимизации процессов ректификации и применения при этом новых подходов к автоматическому управлению распределенными объектами.

Анализ существующих решений в области управления и оптимизации статических режимов работы ректификационных колонн показал, что управляющие воздействия на процесс наносятся традиционным способом – путем изменения материальных или энергетических потоков, поступающих в установку [3]. Однако при управлении таким существенно распределенным объектом это не позволяет раскрыть все его потенциальные возможности.

В последние годы для объектов с распределенными параметрами успешно применяются системы подвижного управления [4]. Появление новой степени свободы – возможности выбора закона движения в пространстве источников вещества и/или энергии – дает положительный эффект [5, 6] и требует дальнейших исследований.

Цель работы – разработка метода расчета оптимальных величин подвижных управляющих воздействий, обеспечивающих при управлении ректификационными колоннами наилучшие экономические показатели процесса.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известна нелинейная математическая модель колонны, позволяющая исследовать технологические основы подвижного управления процессами многокомпонентной ректификации [7]. Модель представляет собой совокупность систем нелинейных уравнений, приводящую в соответствие векторам возмущающих и управляющих воздействий (в том числе и подвижных) вектор выходных координат.

Выходными параметрами – результатами расчетов – являются расходы паровой и жидкой фаз в каждом сечении аппарата, концентрационные и температурный профили колонны в установившемся режиме, энергетическая нагрузка дефлегматора.

Совокупность входных переменных модели включает основные возмущения на процесс – расход, состав и энергетическое состояние питания, а также традицион-

ные управляющие воздействия – тепловую нагрузку куба колонны, расход целевого продукта, флегмы. Изменения номера тарелки питания принимаются в качестве подвижного управляющего воздействия.

Решение систем уравнений, составляющих математическое описание процесса ректификации, совместно с балансовыми уравнениями аппарата позволяет однозначно определить качество продуктов разделения при известных значениях входных переменных [8]

$$\bar{L}, \bar{V}, \bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{t}, Q_d = f(N_f, Q_w, D, F, \bar{x}_f, t_f, P_f, \bar{P}, t_{fl}, t_d, \bar{\eta}_i) \quad (1)$$

Критерием статической оптимизации процессов ректификации является отдельный показатель или функция названных входных и выходных переменных, которая численно выражает заинтересованность в том или ином режиме объекта. При заданных управляющих и возмущающих величинах и необходимых ограничениях критерий оптимизации принимает определенное значение. Тогда задачей статической оптимизации является расчет таких значений традиционных и подвижных управляющих величин при известных возмущающих, которые обеспечивают максимальное (минимальное) значение выбранного отдельного критерия или их совокупности при выполнении определенных ограничений, наложенных на входные и выходные переменные.

Так как зависимость (1), связывающая основные показатели процесса и критерии оптимизации, не может быть представлена в явном виде, то статическая оптимизация процессов ректификации относится к задачам нелинейного программирования и должна решаться соответствующими методами.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Наибольший интерес с позиций статической оптимизации процессов ректификации представляет использование в качестве подвижного управляющего воздействия изменения точки ввода сырья в колонну [5], позволяющее существенно расширить рабочую область объекта управления.

Решению задачи выбора тарелок питания в теории и практике процессов ректификации всегда уделялось серьезное внимание. Общепринятым для практики критерием является технологический, согласно которому расположением тарелки ввода сырья отвечает тому уровню по высоте колонны, на котором концентрации ключевых компонентов в жидкой фазе соответствуют концентрациям в потоке питания [9]. Известны также эмпирические уравнения, позволяющие определять номера тарелок. Недостатки данных упрощенных способов очевидны – результаты слабо обусловлены физико-химическими основами рассчитываемого процесса.

Устранение данного недостатка возможно применением нелинейных моделей процесса ректификации. В качестве показателей оптимальности режимов работы установок различными авторами использовались: раздельная способность колонны, критерий относительной термодинамической раздельной способности колонны (критерий Майкова) и критерий суммы примесей [10], энтропийный критерий, его температурная и концентрационная составляющие [11]. Также рассчиты-

вались энергозатраты на разделение единицы сырья [12], выполнялось построение и анализ семейства «кривых качества» [13].

Однако, как известно, различным критериям статической оптимизации отвечают различные номера оптимальных тарелок питания [14]. В связи с этим необходима методика, позволяющая решать задачи многокритериальной оптимизации и определять такое место ввода сырья, которое дает преимущество согласно нескольким показателям качества одновременно.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обзор литературы показал существование большого числа различных критериев, однако наибольший интерес представляют классические экономические показатели – производительность и энергопотребление. В этом случае значения соответствующих критериев оптимизации численно равны величинам традиционных управляющих воздействий – расходу дистиллята D и расходу тепла в куб колонны Q_w . Решение данной задачи многокритериальной статической оптимизации без использования подвижных управляющих воздействий приведено в [15]. При этом оптимальные величины традиционных управляющих воздействий определялись с использованием нормализованного критерия.

Аналогичный подход предлагается использовать и при определении оптимальной величины подвижного управляющего воздействия – номера тарелки питания.

Требуемое качество продуктов разделения

$$x_{d,nz} = x_{d,nz,min} \quad (2)$$

достижимо при различных значениях выхода целевого продукта и энергозатрат. Между этими значениями существует однозначная зависимость, а их совокупность определяет участок границы рабочей области ректификационной колонны. Для каждой тарелки питания возможно выполнить расчет и построение таких участков. Оптимальной тарелке питания будет отвечать самая широкая область, начальная и конечная точки $(D_{max}; Q_{w,max})$, $(D_{min}; Q_{w,min})$ которой будут смещены в сторону более высоких значений D и более низких Q_w .

И в случае изменения места ввода сырья в колонну, и при подаче питания на регламентированную тарелку важно найти оптимальную точку на границе рабочей области колонны с координатами $(D_{opt}; Q_{w,opt})$, что является первоочередной задачей. Диапазоны, в которых находятся значения оптимальных производительности D_{opt} и энергозатрат $Q_{w,opt}$ ограничены начальной и конечной точками границы рабочей области

$$D_{min} \leq D_{opt} \leq D_{max}, \quad (3)$$

$$Q_{w,min} \leq Q_{w,opt} \leq Q_{w,max}. \quad (4)$$

Величина $Q_{w,min}$ – решение задачи однокритериальной оптимизации, которая заключается в минимизации энергозатрат при заданных минимально допустимых производительности D_{min} и качестве $x_{d,nz,min}$. Аналогично D_{max} представляет собой решение задачи максимизации производительности на основании максимально допустимого расхода пара в куб колонны $Q_{w,max}$, требуемого ка-

чества $x_{d,nz,min}$, а также с учетом экстремальной зависимости $D - Q_w$. Последнее условие не гарантирует, что заданная граничная величина $Q_{w,max}$ обеспечит D_{max} .

Если предположить, что задачи снижения энергозатрат и повышения производительности равноценны и представляют одинаковый интерес, то возможна нормализация критериев оптимизации и переход к условным единицам расчета

$$\lambda_D = \frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad (5)$$

$$\lambda_Q = \frac{Q_{w,max} - Q_w}{Q_{w,max} - Q_{w,min}}. \quad (6)$$

Суммарный показатель, учитывающий повышение выхода целевого продукта совместно со снижением затрат тепла в кипятильнике куба

$$\lambda = \lambda_D + \lambda_Q = \frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} + \frac{Q_{w,max} - Q_w}{Q_{w,max} - Q_{w,min}}. \quad (7)$$

В том случае, если критерии не равнозначны, то возможно использование в (7) дополнительного множителя, представляющего собой отношение стоимости одной условной единицы целевого продукта к стоимости одной условной единицы затрачиваемой энергии

$$z = \frac{E_D}{E_{Q_w}}; \quad (8)$$

$$\lambda = z \cdot \lambda_D + \lambda_Q = z \cdot \frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} + \frac{Q_{w,max} - Q_w}{Q_{w,max} - Q_{w,min}}. \quad (9)$$

Данная задача является двухкритериальной, однако получение зависимости для значительного большего числа критериев по аналогии с (7) не представляет особого труда. Однако использование совместно различных оптимизационных критериев должно быть логически обоснованным.

Так как величины D и Q_w связаны между собой моделью колонны (1) и граничным условием (2), то, задаваясь различными значениями расхода дистиллята D , лежащими в диапазоне от D_{min} до D_{max} , возможно определить соответствующие величины необходимых энергозатрат Q_w . Таким образом, каждому значению D соответствует определенный показатель λ .

Задача многокритериальной оптимизации для заданной тарелки заключается в следующем: необходимо определить такое значение D_{opt} и соответствующее ему $Q_{w,opt}$ которые, с учетом ограничения на качество целевого продукта, обеспечивают максимальное значение показателя эффективности λ .

Алгоритм решения задачи многокритериальной оптимизации содержит следующие действия. Вначале необходимо определить является ли функция экстремальной. Для этого рассчитываются скорости ее изменения в конечных точках при D_{min} и D_{max} . В случае, если скорости положительные, то функция возрастающая и величины

оптимальных управляющих воздействий соответствуют конечной точке границы рабочей области с координатами $(D_{\max}, Q_{w,\max})$. Если же скорости отрицательные, то решением является начальная точка границы $(D_{\min}, Q_{w,\min})$. При невыполнении данных условий многокритериальный подход эффективней однокритериального и осуществляется расчет максимального значения λ_{opt} с использованием метода секущих: проводится итерационный поиск нуля скорости изменения λ .

Приняв начальное приближение расхода дистиллята D , необходимо рассчитать статические характеристики установки и значение целевой функции в точках: $\lambda_1 = f(D - \Delta D)$, $\lambda_2 = f(D)$ и $\lambda_3 = f(D + \Delta D)$. Следующее приближение расхода дистиллята

$$D = D - \Delta D \cdot \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{(\lambda_3 - \lambda_2) - (\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (10)$$

Далее действия повторяются до тех пор, пока не выполнится условие

$$\left| \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\Delta D} \right| \leq \varepsilon. \quad (11)$$

Величину ΔD необходимо подбирать с учетом требуемой точности как алгоритмов оптимизации ε , так и итерационных процедур, использующихся при расчетах статических характеристик колонны.

В точках $(D_{\min}, Q_{w,\min})$ и $(D_{\max}, Q_{w,\max})$ значение λ равно 1, так как они соответствуют однокритериальным оптимизационным задачам.

Номер оптимальной тарелки питания также определяется на основании векторного критерия оптимизации λ (5). Построение границы рабочей области и определение на ней оптимальной точки возможно выполнить для всех возможных тарелок питания и таким образом опре-

делить граничные величины $D_{\min}, D_{\max}, Q_{w,\min}, Q_{w,\max}$. Очевидно, что номеру оптимальной тарелки питания $N_{f,\text{opt}}$ соответствует максимальное значение λ .

В связи с тем, что величина искомого подвижного управляющего воздействия может принимать только дискретные, целочисленные значения, то оптимальным методом расчета является метод сканирования [16]. Достоинство такого подхода заключается в гарантированном нахождении точки оптимума независимо от вида оптимизируемой функции. А недостаток – большой объем расчетов – компенсируется дискретностью значений независимой переменной и необходимостью вычисления значений целевой функции только для нескольких десятков тарелок.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Задача решалась методами математического моделирования с использованием нелинейной модели процесса многокомпонентной ректификации на примере колонны, использующейся для разделения бинарной смеси метанол-вода, содержащей 18 контактных устройств, выносные кипятильник и дефлегматор. Концентрация метанола в питании составляет 0,273 мол. доли. Исходные данные для расчетов: $N_f = 9$, $Q_w = 6,4$ ГДж/ч, $D = 62,8$ кмоль/ч, $x_{d,nz} = 0,973$, $F = 229,3$ кмоль/ч, $t_f = t_{\text{кип}}$, $P_f = P_{f=0} = P_{f=18} = 1$ атм, $t_{f1} = t_{\text{кип}}$, $t_d = t_{\text{кип}}$, $\beta_x = 3060,5$ кмоль/(м²·ч), $\beta_y = 142,82$ кмоль/(м²·ч) [13].

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлена граница рабочей области колонны на примере регламентированной 9-й тарелки, на ней отмечены решения оптимизационной задачи для различных значений коэффициента z . Так как граница рабочей области для 9-й тарелки вырождается в точку при регламентированных значениях D и Q_w , то приняты следующие граничные значения: $D_{\min} = 55$ кмоль/ч и $Q_{w,\max} = 9$ ГДж/ч.

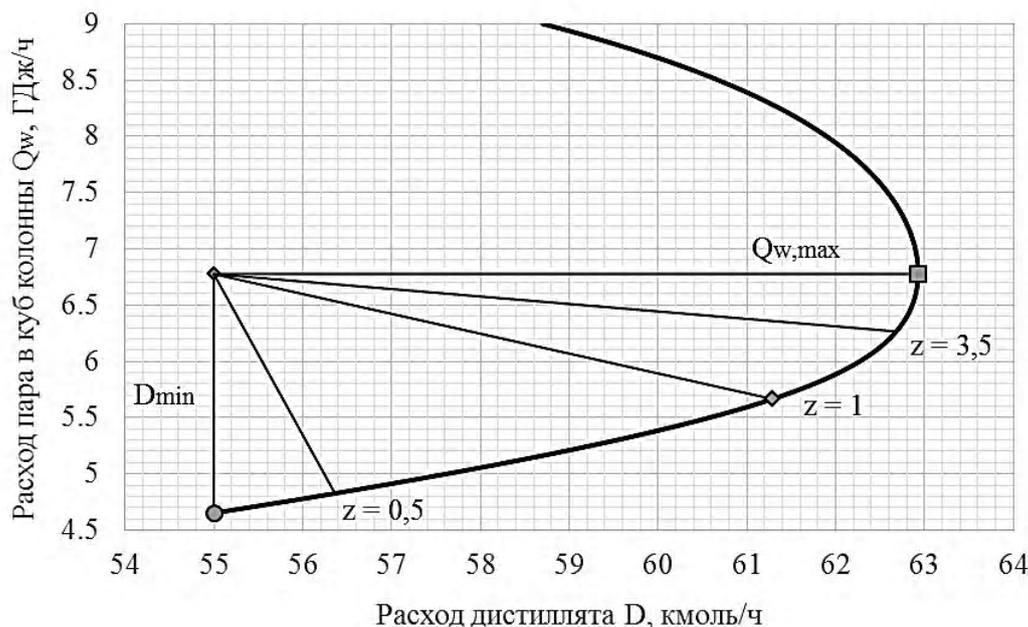


Рисунок 1 – Многокритериальная статическая оптимизация процесса ректификации при управлении колонной традиционным способом

На рис. 2 показано изменение показателей эффективности λ по мере движения вдоль данной границы при $z = 1$.

Оптимальные для регламентированного режима работы колонны величины выхода продукта и затрат тепла в куб при $z = 1$ составляют соответственно 61,29 кмоль/ч и 5,67 ГДж/ч, а максимальное значение нормализованного критерия $\lambda - 1,315$. Приведенный многокритериальный подход к статической оптимизации при управле-

нии ректификационной колонной традиционным способом позволяет повысить производительность установки на 6,29 кмоль/ч или 79,35% от максимально возможного и, одновременно с этим, снизить энергозатраты на 1,11 ГДж/ч или 52,29% от максимально возможной экономии энергоресурсов.

С целью определения оптимального места ввода сырья в колонну подобные расчеты возможно осуществить для всех тарелок питания, решения представлены на рис. 3.

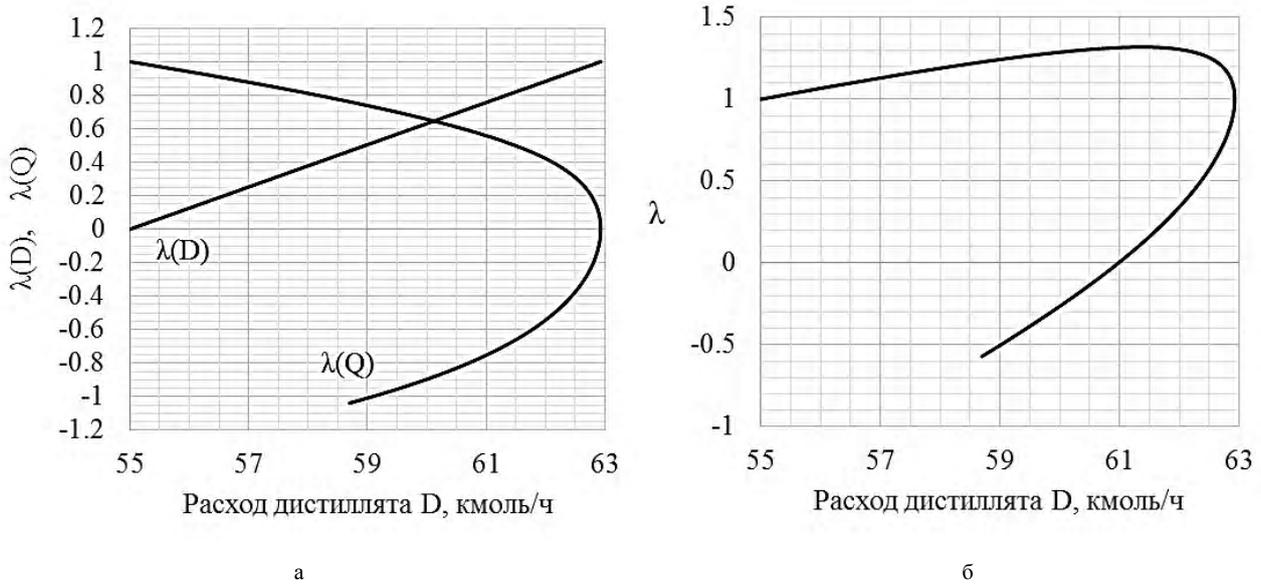


Рисунок 2 – Зависимость оптимизационных критериев от выхода целевого компонента: а – частных, б – нормализованного

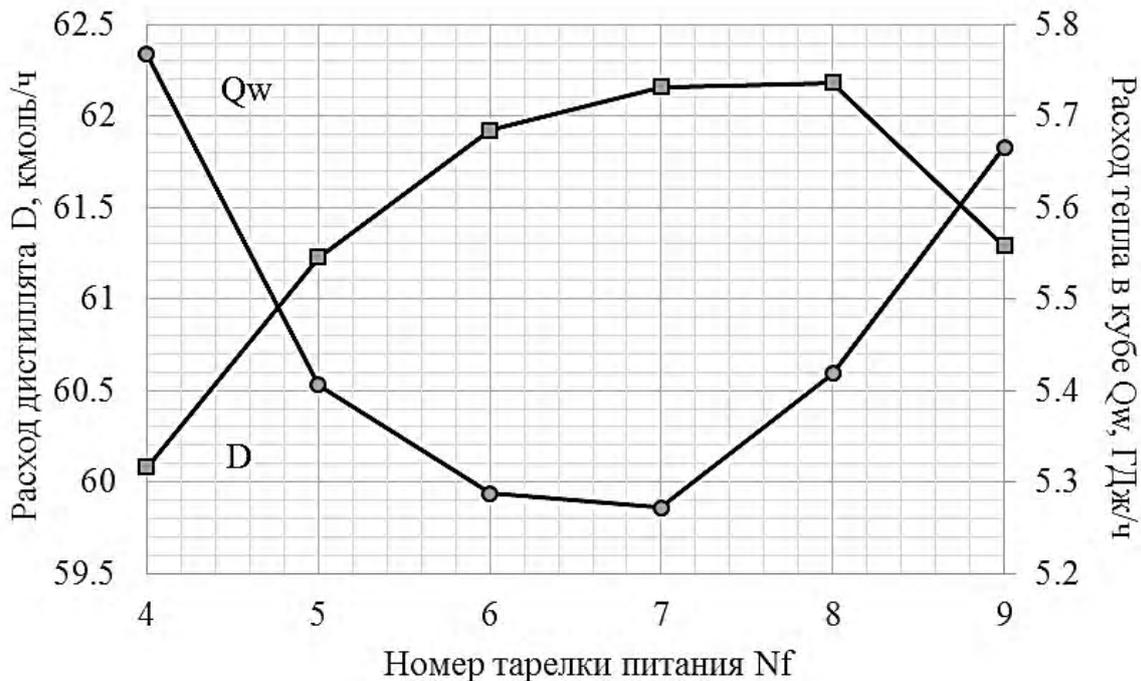


Рисунок 3 – Решения задачи многокритериальной оптимизации для различных тарелок питания

На рис. 4 приведены зависимости показателей эффективности согласно отдельным критериям (λ_D и λ_Q) и суммарного (λ) от величины подвижного управляющего воздействия – номера тарелки питания.

Оптимальной тарелкой питания является 7-я тарелка, максимальный показатель λ равен 1,989, а суммарные потери S составляют 0,011.

На рис. 5 показано смещение границы рабочей области при переключении подачи сырья с 9-й на 7-ю тарелку, а также решения оптимизационных задач с использованием подвижного управляющего воздействия и без использования.

При подвижном управлении процессом оптимальные величины D_{opt} и $Q_{w,opt}$ составляют 62,16 кмоль/ч и 5,272 ГДж/ч. По сравнению с результатами статической оптимизации без использования подвижных управляющих воздействий наблюдается повышение производительности, составляющее 1,41%, при экономии тепла на 6,95%.

Ранее исследовался только регламентированный режим работы ректификационной установки. На данном примере отмечено, что использование подвижных управляющих воздействий при статической оптимизации процесса ректификации позволяет снизить затраты теп-

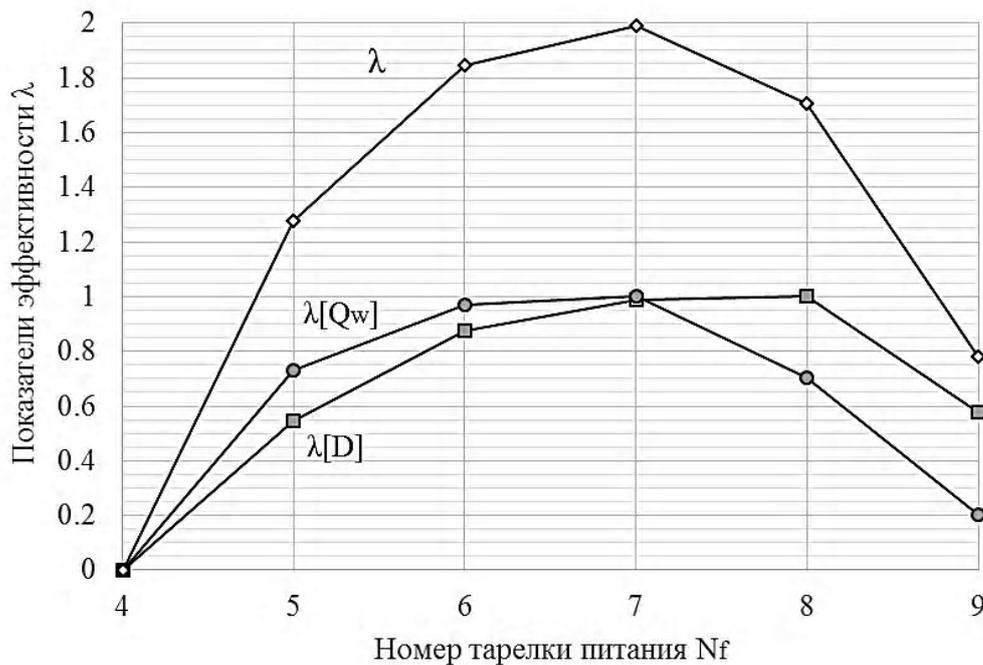


Рисунок 4 – Расчет номера оптимальной тарелки питания при решении задачи многокритериальной статической оптимизации

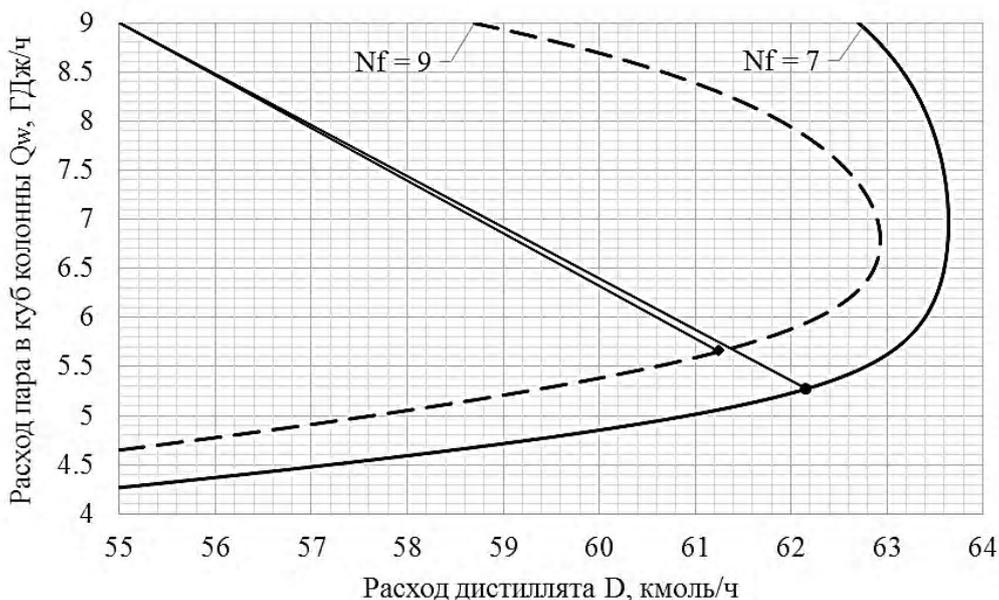


Рисунок 5 – Многокритериальная статическая оптимизация процесса ректификации с использованием подвижных управляющих воздействий

ла в куб колонни и, совместно с этим, повысит выход целевого продукта. Однако в других режимах работы колонны ситуация может носить обратный характер и эффективность подвижного управления исследовалась

при изменении характеризующих процесс параметров в широких пределах (рис. 6). Граничные значения D_{\min} и $Q_{w,\max}$ при этом выбраны равными регламентированному 62,8 кмоль/ч и 6,4 ГДж/ч соответственно.

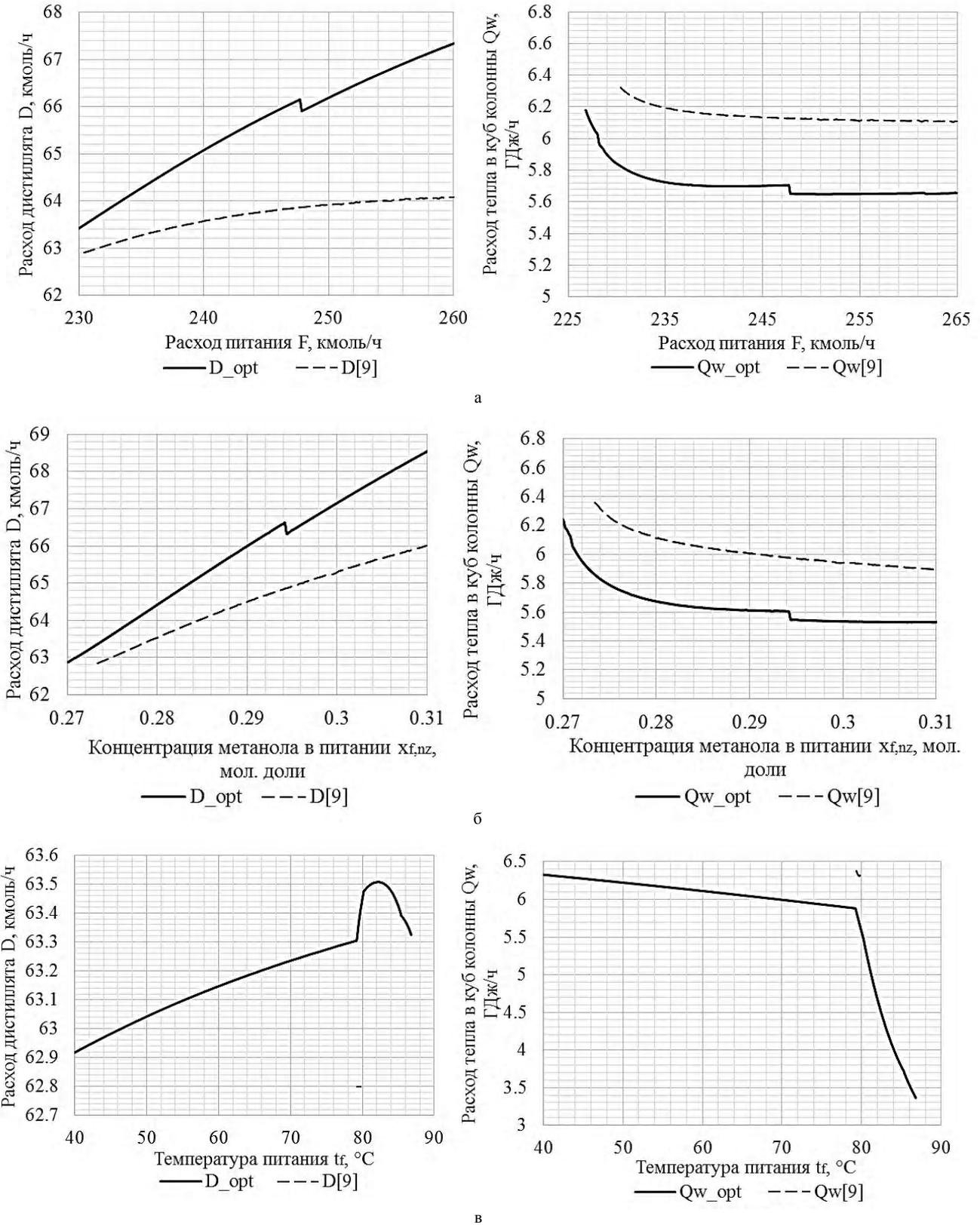


Рисунок 6 – Оптимальные производительность и энергозатраты в зависимости от: а) – расхода питания; б) – состава питания; в) – температуры питания

При исследовании оптимальных статических режимов работы ректификационной колонны в широком диапазоне изменений режимных параметров также отмечается эффективность подвижных управляющих воздействий и подхода многокритериальной оптимизации. Расчеты показывают повышение производительности в пределах от 1% до 5% путем переключения точки ввода сырья в колонну. Экономия тепла в кубе составляет 6–8%.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Использование нелинейной математической модели процесса ректификации при решении задачи статической оптимизации позволяет прогнозировать и рассчитывать оптимальные режимы работы колонны с учетом ее распределенности и нелинейности как объекта управления.

При использовании таких критериев, как максимизация производительности и минимизация энергозатрат, задача статической оптимизации заключается в определении такой тарелки ректификационной колонны, подача питания на которую позволяет обеспечить наилучшее соотношение между выходом целевого продукта и затратами тепла в кубе колонны при соблюдении необходимого качества разделения.

Для каждой тарелки ректификационной установки возможно выполнить построение границы рабочей области в пространстве традиционных управляющих воздействий $D - Q_w$. Решения задачи многокритериальной оптимизации существенно зависят от принятых ограничений D_{\min} и $Q_{w,\max}$, в связи с чем данные величины должны быть технологически или экономически обоснованы.

Снижение расхода или качества питания приводит к существенному сужению рабочей области ректификационной колонны. Существуют граничные величины F и $x_{f,nz}$, когда дальнейшее снижение нагрузки колонны не позволит обеспечить требуемое качество конечного продукта $x_{d,nz,\min}$. При изменениях расхода питания, концентрации целевого компонента в питании, температуры питания необходимо корректировать и требования к качеству целевого продукта (2).

Использование подвижных управляющих воздействий позволяет расширить рабочую область ректификационной колонны. Так, в случае подачи питания на 9-ю тарелку требуемая концентрация дистиллята достигается при температуре сырья 79,3–79,8°C (рис. 6в). В то же время, подача сырья на оптимальную, 7-ю тарелку позволяет обеспечить необходимое качество продукта в температурном диапазоне питания от 20 до 86,8°C.

Зависимость концентрации метанола в дистилляте от температуры питания экстремальна, что позволяет использовать температуру питания в качестве второй степени свободы подвижного управляющего воздействия – его интенсивности.

Номер оптимальной тарелки питания понижается при повышении материальной или энергетической нагрузки колонны.

ВЫВОДЫ

Впервые разработан метод многокритериальной статической оптимизации процессов ректификации с использованием подвижных управляющих воздействий.

Предложено рассчитывать оптимальную величину дискретного подвижного управляющего воздействия – номер оптимальной тарелки питания – с учетом не одного, а сразу нескольких оптимизационных критериев на основании измерений и расчетов основных показателей процесса (расхода, состава и температуры питания, профиля давления в колонне, давления в линии подачи питания, температур дистиллята и флегмы, эффективностей контактных устройств).

Доказана на примерах критериев максимизации производительности и минимизации энергозатрат экстремальная зависимость нормализованного критерия оптимизации от номера тарелки питания, из чего следует существование и однозначность решения задачи многокритериальной статической оптимизации процессов ректификации. Для решения данной оптимизационной задачи предложен метод сканирования, так как величина искомого подвижного управляющего воздействия может принимать только дискретные, целочисленные значения.

Определена эффективность многокритериальной статической оптимизации процессов ректификации с использованием подвижных управляющих воздействий на примере нормального режима работы колонны для разделения смеси метанол-вода, так и при изменениях основных показателей процесса в широких пределах. Методами математического моделирования доказано повышение производительности, составляющее 1–5%, при экономии тепла в кубе колонны на 6–8%.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при построении оптимальных систем статической оптимизации процессов ректификации, систем оптимального управления ректификационными колоннами.

Предложенные методы многокритериальной статической оптимизации применимы для процессов многокомпонентной, сложной ректификации.

Дальнейшие исследования в данном направлении заключаются в разработке методов и алгоритмов статической оптимизации процессов ректификации с использованием непрерывных подвижных управляющих воздействий, подвижных воздействий с двумя степенями свободы, в моделировании переходных процессов в ректификационных колоннах при подвижном управлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббаси М. К. Б. Энергосбережение в процессах ректификации бинарных и многокомпонентных смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / М. К. Б. Аббаси. – Москва, 2014. – 122 с.
2. Ядыкин И. Б. Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами / И. Б. Ядыкин, В. М. Шумский, Ф. А. Овсян. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
3. Исследование оптимальных статических режимов сложной ректификационной колонны для получения этилена / [В. П. Кривошеев, К. Е. Никифорова, А. В. Ануфриев, Б. А. Кан] // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 6. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11210>.
4. Рапопорт Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами : учеб. пособие / Э. Я. Рапопорт. – М. : Высш. шк., 2005. – 292 с.
5. Белоброва Е. В. Автоматическое управление тепломассообменными процессами с подвижными распределенными регулирующими воздействиями / Е. В. Белоброва, А. Р. Шейкус,

- В. И. Корсун // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/2 (71). – С. 51–55. DOI: 10.15587/1729–4061.2014.28037.
6. Левчук И. Л. Способ управления процессом ректификации с помощью распределенных управляющих воздействий / И. Л. Левчук, А. Р. Шейкус, В. Я. Тришкин // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – № 14 (1123). – С. 100–105.
 7. Komissarov Yu. A. Multicomponent distillation calculations using computer simulation principles / Yu. A. Komissarov, Dam Quang Sang // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 48, Issue 3. – P. 280–287. DOI: 10.1134/S0040579514030087
 8. Developing a technique for improving the efficiency of iterative methods for the calculation of the multicomponent rectification process / [Anton Sheikus, Elena Belobrova, Yaroslav Dovgopoliy et al] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, № 2 (84). – P. 38–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85372.
 9. Петлюк Ф. Б. Многокомпонентная ректификация. Теория и расчет / Ф. Б. Петлюк, Л. А. Серафимов. – М. : Химия, 1983. – 304 с.
 10. Кузнецов В. Г. Алгоритмизация и оптимизация технологического процесса ректификации нефти : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Кузнецов В. Г. – Самара, 2005. – 216 с.
 11. Хахин Л. А. Разработка энтропийной оценки работы ректификационных колонн и функциональных комплексов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.04 / Л. А. Хахин. – Москва, 2009. – 219 с.
 12. Выбор оптимальных тарелок питания в замкнутой системе ректификационных колонн / [Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева, Д. А. Рыжов] // ТОХТ. – 2008. – Т.42, №4. – С. 401–412.
 13. Леонтьев В. С. Оптимизация одноколонных ректификационных аппаратов для химических технологий и процессов нефтепереработки / В. С. Леонтьев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 2. – С. 255–264. URL: http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev_4.pdf.
 14. Анисимов И. В. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок / И. В. Анисимов, В. И. Бодров, В. Б. Покровский. – М. : Химия, 1975. – 216 с.
 15. Торгашов А. Ю. Управление оптимальными статическими режимами ректификационных колонн на основе нелинейных моделей процесса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / А. Ю. Торгашев. – Владивосток, 2000. – 140 с.
 16. Бояринов А. И. Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1969. – 564 с.

Статья поступила в редакцию 11.05.2017.
После доработки 12.07.2017.

Шейкус А. Р.¹, Тришкин В. Я.²

¹Аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології Українського державного хіміко-технологічного університету, Дніпро, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології Українського державного хіміко-технологічного університету, Дніпро, Україна

СТАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РЕКТИФІКАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ РУХЛИВИХ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу багатокритеріальної статичної оптимізації процесів ректифікації з використанням рухливих керуючих дій, які полягають у зміні місця введення сировини в колону, а також досліджено ефективність їх використання при різних статичних режимах процесу.

Мета роботи – підвищення продуктивності процесу ректифікації і зниження енергетичних витрат на його ведення шляхом використання при управлінні процесом рухливих керуючих впливів і багатокритеріального підходу до розрахунку їх оптимальних величин.

Метод. Запропоновано методи розрахунку оптимальної тарілки живлення спільно із розрахунками оптимальних величин традиційних керуючих впливів – витрати пари в куб колони і виходу цільового продукту – на підставі критеріїв максимізації продуктивності і мінімізації енерговитрат з використанням нормалізованого критерію оптимізації. Розрахунки проводяться з використанням нелінійної математичної моделі процесу, яка описує процеси тепло- і масообміну на кожному контактному пристрої установки. Розрахунок оптимальної точки на межі робочої області ректифікаційної колони в координатах традиційних керуючих дій запропоновано вести методом січних. Так як величина шуканого рухливого керуючого впливу може приймати тільки дискретні, цілочисельні значення, то для вирішення оптимізаційної задачі запропоновано метод сканування.

Результати. Розроблений оптимізаційний метод використовувався для розрахунків оптимальних статичних режимів ректифікаційної колони для поділу суміші метанол-вода при зміні значень параметрів моделі в широких межах. Доведено екстремальну залежність від величини рухливого керуючого впливу як окремих критеріїв, так і нормалізованого критерію оптимізації. Результати моделювання показали, що використанням рухливих керуючих впливів досягається підвищення продуктивності на 1–5% при економії тепла в кубі колони на 6–8%.

Висновки. Проведені дослідження довели ефективність багатокритеріального підходу до вирішення задачі статичної оптимізації процесів ректифікації з використанням рухливих керуючих впливів, що дозволяє використовувати його на практиці. Запропоновані методи статичної оптимізації застосовні для процесів багатоконпонентної, складної ректифікації. Подальші дослідження в даному напрямку полягають в розробці методів і алгоритмів статичної оптимізації процесів ректифікації з використанням неперервних рухливих керуючих впливів, рухливих впливів з двома ступенями свободи, в моделюванні перехідних процесів в ректифікаційних колонах при рухливому керуванні.

Ключові слова: процес ректифікації, рухливе керування, багатокритеріальна статична оптимізація.

Sheikus A. R.¹, Trishkin V. Ya.²

¹Postgraduate student of Department of computer integrated technology and metrology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

²Candidate of technical science, Associate professor, Associate professor of Department of computer integrated technology and metrology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

STATIC OPTIMIZATION OF RECTIFICATION PROCESSES USING MOBILE CONTROL ACTIONS

Context. The actual task of multi-criteria static optimization of rectification processes with the use of mobile control actions that consist in changing the place of input of raw materials into a column is solved, and the efficiency of their use in various static modes of the process is investigated.

Objective – increasing the productivity of the process of rectification and reducing the energy costs by using mobile control actions and a multi-criteria approach to the calculation of their optimal values.

Method. Methods are proposed for calculating the optimum feed plate together with calculations of the optimal values of traditional control actions – steam flow to the column cube and the yield of the target product – based on the criteria for maximizing productivity and minimizing energy consumption using the normalized optimization criterion. Calculations are carried out using a nonlinear mathematical model of the process, describing the heat and mass transfer processes on each column contact device. Calculation of the optimal point at the boundary of the working region of the rectifying column in the coordinates of traditional control actions is suggested to be carried out by the method of secants. Since the magnitude of the desired mobile control action can only take on discrete, integer values, a scanning method is proposed to solve the optimization problem.

Results. The developed optimization method was used to calculate the optimal static regimes of the rectification column for separating the methanol-water mixture when the values of the model parameters vary widely. Extremal dependence on the magnitude of the mobile control action of both individual criteria and a normalized optimization criterion is proved. The results of the simulation showed that the increase in productivity achieved by the use of mobile control actions is 1 to 5%, while the heat savings in the reboiler of the column are 6–8%.

Conclusions. The carried out researches have proven the effectiveness of the multi-criteria approach to the solution of the problem of static optimization of rectification processes using mobile control actions, which allows using it in practice. The proposed methods of static optimization are applicable for processes of multicomponent, complex rectification. Further research in this direction include the development of methods and algorithms of the static optimization of rectification processes using continuous mobile control actions, mobile actions with two degrees of freedom, modeling of transient responses in rectification columns at mobile control.

Keywords: rectification process, mobile control, multi-criteria static optimization.

REFERENCES

1. Abbasi M. K. B. E'nergoberezhnie v processax rektifikacii binarnyx i mnogokomponentnyx smesey [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.17.08. Moscow, 2014, 122 p.
2. Yadykin I. B., Shumskij V. M., Ovsepyan F. A. Adaptivnoe upravlenie nepreryvnymi tehnologicheskimi processami [Tekst]. Moscow, E'nergoatomizdat, 1985, 240 p.
3. Krivosheev V. P., Nikiforova K. E., Anufriev A. V., Kan B. A. Issledovanie optimal'nyx staticheskix rezhimov slozhnoj rektifikacionnoj kolonny dlya polucheniya e'tilena [Tekst], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, № 6. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11210>.
4. Rapoport E'. Ya. Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya s raspredelennymi parametrami [Tekst]: ucheb. posobie. Moscow, Vyssh. shk., 2005, 292 p.
5. Belobrova E. V., Sheikus A. R., Korsun V. I. Avtomaticheskoe upravlenie teplomassoobmennymi processami s podvizhnymi raspredelennymi reguliruyushhimi vozdeystviyami [Tekst], *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyx tehnologij*, 2014, No. 5/2 (71), pp. 51–55. DOI: 10.15587/1729–4061.2014.28037.
6. Levchuk I. L., Sheikus A. R., Trishkin V. Ya. Sposob upravleniya processom rektifikacii s pomoshh'yu raspredelennyx upravlyayushhix vozdeystvij [Tekst], *Vestnik NTU "XPI". Seriya: Novye resheniya v sovremennyx tehnologiyax*. Xar'kov, NTU "XPI", 2015, No. 14 (1123), pp. 100–105.
7. Komissarov Yu. A., Dam Quang Sang Multicomponent distillation calculations using computer simulation principles, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, Vol. 48, Issue 3, pp. 280–287. DOI: 10.1134/S0040579514030087
8. Sheikus A., Belobrova Elena, Dovgopoliy Yaroslav, Levchuk Igor, Korsun Valeriy Developing a technique for improving the efficiency of iterative methods for the calculation of the multicomponent rectification process, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 6, No. 2 (84), pp. 38–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85372.
9. Petlyuk F. B., Serafimov L. A. Mnogokomponentnaya rektifikaciya. Teoriya i raschet [Tekst]. Moscow, Ximiya, 1983, 304 p.
10. Kuznecov V. G. Algoritmizaciya i optimizaciya tehnologicheskogo processa rektifikacii nefiti [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.13.06. Samara, 2005, 216 p.
11. Xaxin L. A. Razrabotka e'ntropijnoj ocenki raboty rektifikacionnyx kolonn i funkcional'nyx kompleksov [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.17.04. Moscow, 2009, 219 p.
12. Ostrovskij G. M., Ziyatdinov N. N., Lapteva T. V., Ryzhov D. A. Vybór optimal'nyx tarelok pitaniya v zamknutoj sisteme rektifikacionnyx kolonn, *TOXT*, 2008, Vol. 42, No. 4, pp. 401–412.
13. Leont'ev V. S. Optimizaciya odnokolonnyx rektifikacionnyx apparatov dlya ximicheskix tehnologij i processov neftepererabotki [Tekst], *E'lektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo"*, 2012, No. 2, pp. 255–264. URL: http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev_4.pdf.
14. Anisimov I. V., Bodrov V. I., Pokrovskij V. B. Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya rektifikacionnyx ustanovok [Tekst]. Moscow, Ximiya, 1975, 216 p.
15. Torgashov A. Yu. Upravlenie optimal'nymi staticheskimi rezhimami rektifikacionnyx kolonn na osnove nelinejnyx modelej processa [Tekst]: dis. ... kand. texn. nauk: 05.13.07. Vladivostok, 2000, 140 p.
16. Boyarinov A. I., Kafarov V. V. Metody optimizacii v ximicheskoy tehnologii [Tekst]. Moscow, Ximiya, 1969, 564 p.