

Динамическая имитационная модель установки удаления тяжелых углеводородов из осушенного сырьевого газа в условиях низкотемпературной ректификации

Е. Д. Иващенко¹, Р. Л. Барашкин²

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

¹ivashchenko.e@gubkin.ru, ²barashkin.r@gubkin.ru

Аннотация. Проведен анализ процесса удаления тяжелых углеводородов из осушенного сырьевого газа в условиях низкотемпературной ректификации с помощью разработанной динамической имитационной модели технологического процесса. Целью исследования было выявление потенциальных причин и разработка рекомендаций по предотвращению нештатных и аварийных ситуаций, возникающих в результате критического снижения уровня жидкости, предельного отклонения температурного режима, увеличения давления сырьевого газа, колебания расхода питания колонны. В рамках исследования динамики процесса изучены условия формирования газовых пробок в ребойлере и причины захлебывания колонны. В результате проведенных исследований предложены рекомендации по предотвращению возможных нештатных и аварийных ситуаций. Также предложено внедрение многопараметрического контроллера для обеспечения стабильного рабочего режима колонны и минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: установка удаления тяжелых углеводородов, низкотемпературная ректификация, газовые пробки, захлебывание колонны, динамическая имитационная модель, система управления, многопараметрический контроллер.

I. МОДИФИКАЦИЯ СХЕМЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ В ПАКЕТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ректификационная колонна является ключевым аппаратом в массообменных процессах разделения смесей на компоненты [1], в том числе в рассматриваемой установке удаления тяжелых углеводородов из осушенного сырьевого газа [2]. Для учёта специфики исследуемого технологического процесса предложена модификация шаблона схемы колонны из стандартной библиотеки элементов пакета технологического моделирования [3]. В базовом шаблоне куб колонны представляет собой первую тарелку и не имеет объема. Для воспроизведения возможных нештатных и аварийных ситуаций куб колонны реализован в составе резервуара (Cube) с заданным объемом и системы клапанов, имитирующих местные сопротивления (рис. 1).

Рейблер реализован с помощью трёх секций (рис. 1). Нижняя секция рейблера (LSR) предназначена для заполнения жидкой фазой, которая далее подаётся в межтрубное пространство теплообменной секции. Теплообменная секция (HS) предназначена для нагрева и испарения жидкости [4]. Верхняя секция рейблера

(HSR), представляет собой трубу возврата, в которую подаётся нагретый флюид из теплообменной секции в виде газожидкостной смеси и направляется обратно в кубовую часть ректификационной колонны. Предложенное разделение рейблера на три секции позволило воспроизвести эффекты, которые наблюдались на производстве и провести исследование динамики установки удаления тяжёлых углеводородов [5].

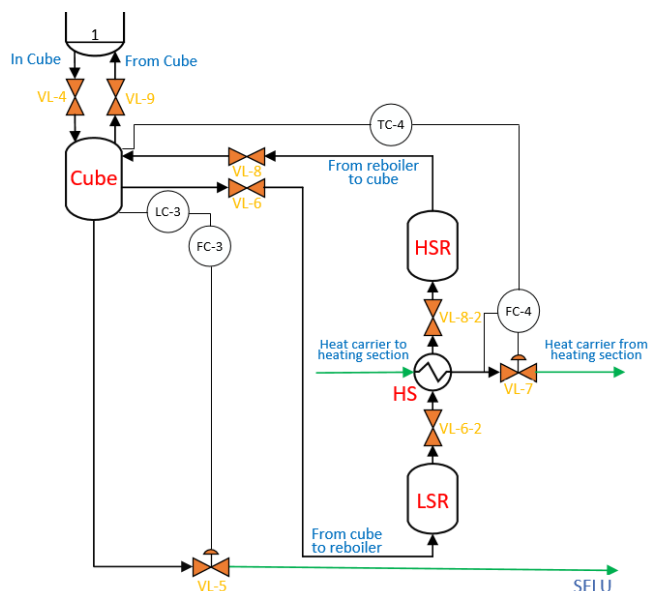


Рис. 1. Модифицированная схема шаблона ректификационной колонны

II. СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Для определения структуры системы управления технологическим процессом был проведен анализ числа степеней свободы (ЧСС) по методике Конда [6].

$$\text{ЧСС} = N_{\text{Оч}} - N_{\text{Пч}} - N_{\text{Ич}} \quad (1)$$

Общее число потоков $N_{\text{Оч}}$ для данной установки равно 20. Предельное число потоков $N_{\text{Пч}}$ по методике равно 0. Число избыточных потоков $N_{\text{Ич1}}$ равно 13. Управление потоком «Output stream 1» может создавать дополнительные возмущения в системе из-за большой инерционности контролируемой переменной, поэтому для одной из исследуемых структур управления отнесем его к избыточным ($N_{\text{Ич2}} = 14$) [7]. Тогда ЧСС для двух рассматриваемых структур систем управления будет равно [8]:

$$\text{ЧСС}_1 = 20 - 0 - 13 = 7 \quad (2)$$

$$\text{ЧСС}_2 = 20 - 0 - 14 = 6 \quad (3)$$

Число степеней свободы управления соответствует количеству контуров регулирования, которые требуются для управления рассматриваемым ТП.

Далее были выбраны регулируемые переменные, определены управляющие воздействия и парные переменные, настроены одноконтурные и каскадные системы регулирования для двух структур систем управления [9].

Проведён сравнительный анализ двух предложенных структур систем управления (табл. 1) с помощью показателя чувствительности к возмущающим воздействиям (ЧВВ) [10]. В качестве возмущающих воздействий изменялись давление и температура на входе в блок удаления тяжёлых углеводородов в диапазонах от 6300 до 6150 кПа и от 21,98 °С до 29 °С соответственно.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Структура системы управления	ЧВВ при понижении давления входного потока	ЧВВ при повышении температуры входного потока	Суммарный ЧВВ
$N_{\text{ИЧ1}} = 13$	74,49	12,54	87,03
$N_{\text{ИЧ2}} = 14$	10,87	6,092	16,962

По результатам исследования структур, система управления с 6 степенями свободы (рис. 2) показала наилучшие показатели качества регулирования [11].

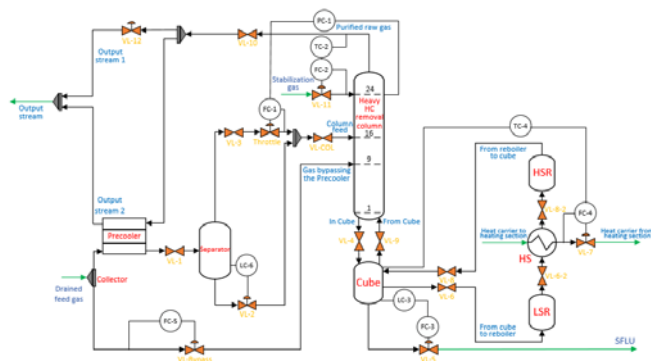


Рис. 2. Предложенная по методике Конда структура системы управления технологическим процессом

В рамках предложенной структуры системы управления давление верха колонны стабилизируется для поддержания фазового равновесия и обеспечения эффективного разделения компонентов в процессе ректификации с помощью каскадного контура регулирования давления PC-1 с коррекцией по расходу питания FC-1.

Для предотвращения опустошения или перелива сепаратора осуществляется поддержание заданного уровня с помощью контура регулирования LC-6.

Для поддержания стабильного режима ректификации и эффективного разделения компонентов управление температурным профилем колонны было предложено реализовать с помощью каскадного контура регулирования температуры верха колонны TC-2 с коррекцией по расходу орошения колонны FC-2, а также каскадного контура регулирования температуры куба

колонны с внешним регулятором температуры TC-4 и внутренним регулятором расхода FC-4.

В целях предотвращения захлебывания колонны и обеспечения необходимого фазового состояния кубового продукта предложен каскадный контур регулирования с внешним регулятором уровня LC-3 и внутренним регулятором расхода FC-3 для стабилизации уровня жидкости в кубе колонны.

Для управления расходом газа в линии дополнительного подвода тепла в колонну (Gas bypassing the Precooler) предусмотрен регулятор FC-5.

III. КРИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В КУБЕ КОЛОННЫ

Колонна удаления тяжелых углеводородов предназначена для работы с газом при температуре питания около -80 °С. Для поддержания циркуляции потока через ребойлер необходимо соблюдать определенный уровень жидкости в кубе колонны, который создает необходимое гидростатическое давление [12].

В ходе эксперимента с применением динамической имитационной модели уровень в кубе колонны плавно снижали, начиная с 80,5 %. После достижения уровня равного 76%, возникает нехватка гидростатического давления и циркуляция флюида через ребойлер прекращается (рис. 3).

При снижении уровня жидкости ниже критического значения возникает риск захлебывания колонны. Для обеспечения нормальной работы ребойлера необходимо поддерживать высокий уровень в кубе колонны выше 80%.

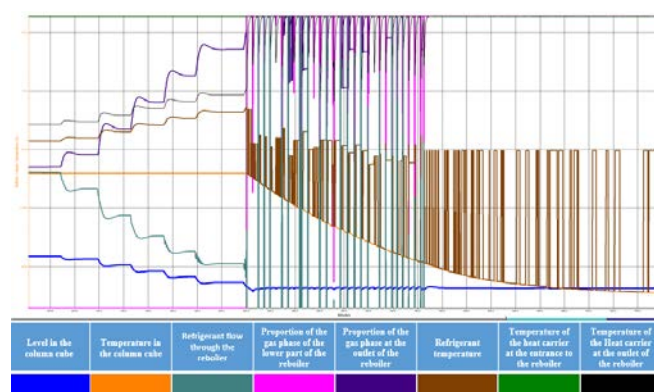


Рис. 3. Графики изменения технологических параметров при уменьшении уровня жидкости в кубе колонны

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ В КУБЕ НА РЕЖИМ РАБОТЫ КОЛОННЫ

В рамках исследования уровень в кубе колонны снижался с 80,5 до 75, 70, 65, 60% (рис. 4). После продолжительных переходных колебательных процессов установке удавалось вернуться к рабочему режиму. При этом увеличение амплитуды изменения уровня сопровождалось ростом времени выхода колонны на рабочий режим.

При снижении уровня с 80,5 до 50% достигается критическое значение, в результате чего установке не удастся вернуться на рабочий режим (рис. 4).

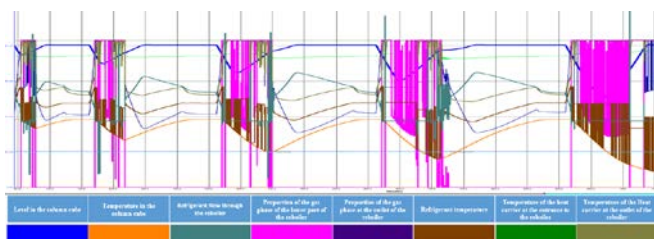


Рис. 4. Графики изменения технологических параметров колонны при изменении уровня жидкости

V. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ПРОБОК В РЕБОЙЛЕРЕ

В результате снижения гидростатического давления в кубе колонны начинает снижаться расход флюида через ребойлер (рис. 5). При дальнейшем снижении расхода флюида через ребойлер прекращается циркуляция в трубах от куба колонны к ребойлеру, что приводит к избыточной мгновенной мощности ребойлера. Вследствие чего в межтрубном пространстве ребойлера начинают формироваться газовые пробки.

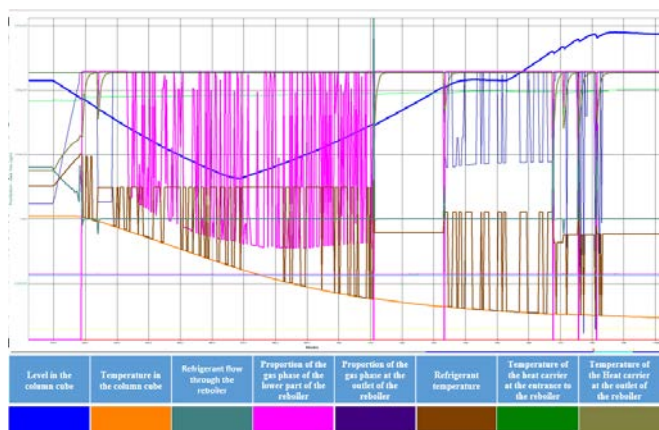


Рис. 5. Графики изменения технологических параметров колонны во время формирования газовых пробок в ребойлере

В результате теплообменник теряет свою эффективность, поскольку газовая фаза существенно снижает теплопередачу, что отражается на незначительно изменяющейся температуре теплоносителя на выходе трубного пространства ребойлера.

В верхней части ребойлера может скапливаться значительное количество жидкости, которая дополнительно усложняет процесс вытеснения газовых пробок из нижних секций ребойлера.

В процессе динамического моделирования можно наблюдать эффект попытки вытеснения газовых пробок, когда периодическое продвижение жидкой фазы через ребойлер приводит к резкому увеличению расхода и дальнейшему его снижению. Однако температура в кубе не успевает подняться до необходимого уровня, газовая фаза заполняет ребойлер и гидростатического давления оказывается недостаточно для вытеснения газовых пробок. Процесс вытеснения газовой пробки усложняется дополнительными местными сопротивлениями, обусловленными существенной протяженностью труб и их изгибами.

Рост давления в ребойлере компенсируется повышением уровня жидкости в кубе колонны. Уровень жидкости в ребойлере поднимается выше точки ввода обратной подачи флюида из ребойлера, что создаёт

дополнительное сопротивление и препятствует вытеснению газовой пробки из ребойлера.

Также образование газовых пробок в ребойлере может осуществляться в результате проблем с управлением в результате неверных измерений уровня, неисправности датчика уровня или неверного верхнего предела регулирования.

При формировании газовых пробок в ребойлере необходимо учитывать, что увеличение уровня в кубе колонны не позволит возобновить циркуляцию через ребойлер, а наоборот повысит вероятность затопления тарелок колонны.

Кроме того, вышеописанный процесс вытеснения нагретой газовой фазы создает риск залпового истечения газа из ребойлера через жидкость, которое может привести к резкому повышению давления и уровня кубовой жидкости.

VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВХОДНОГО ПОТОКА НА РЕЖИМ РАБОТЫ КОЛОННЫ

При понижении температуры осушенного сырьевого газа ниже 0°C , что значительно ниже регламентного значения 18°C , наблюдается уменьшение температуры и увеличение расхода питания колонны (рис. 6). Данные изменения приводят сначала к резкому росту расхода флюида через ребойлер, а затем к стремительному падению температуры в кубе колонны.

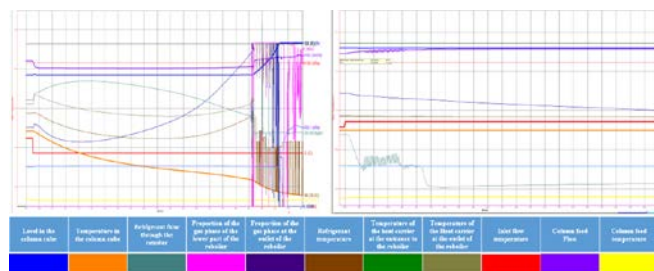


Рис. 6. Графики изменения технологических параметров колонны в результате изменения температуры входного потока

С течением времени расход флюида через ребойлер начинает быстро уменьшаться, вся жидкая фаза в ребойлере переходит газовую фазу, температура в кубе колонны достигает критического значения минус 53°C , что приводит к прекращению циркуляции флюида через ребойлер. При этом в нижних секциях ребойлера формируются газовые пробки, а верхняя секция запирается жидкой фазой. Затем уровень в кубе колонны начинает постепенно расти, возникает захлебывание колонны и последующее затопление тарелок.

При малых амплитудах уменьшения температуры осушенного сырьевого газа температура в кубе стабилизируется, при этом циркуляция флюида через ребойлер не прекращается и не возникают нештатные или аварийные ситуации.

При повышении температуры осушенного сырьевого газа выше регламентного значения 29°C , наблюдается увеличение температуры и уменьшение расхода питания колонны. В результате уменьшается расход флюида через ребойлер, однако температура в кубе колонны продолжает соответствовать заданному значению. С течением времени расход флюида через ребойлер начинает увеличиваться.

Незначительные превышения температуры газа осушенного сырьевого газа выше регламентного значения не нарушают работу ребойлера и в целом всей колонны, но нарушают качество процесса удаления тяжелых углеводородов. Такой режим работы установки не допустим на производстве.

VII. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВХОДНОГО ПОТОКА НА РЕЖИМ РАБОТЫ КОЛОННЫ

При повышении давления осушенного сырьевого газа наблюдается уменьшение температуры и увеличение расхода питания колонны, при этом снижается температура в кубе колонны, несмотря на первоначальный резкий рост расхода флюида через ребойлер. Если повышение давления осушенного сырьевого газа не превышает регламентного значения 6,6 МПа, то с течением времени расход через ребойлер начинает медленно уменьшаться, падение температуры в контуре куб-ребойлер замедляется, устанавливается новый технологический режим. При этом расход питания колонны меняется незначительно, а температура питания колонны остается неизменной.

В случае значительного превышения регламентного значения давления осушенного сырьевого газа будет наблюдаться переходный процесс аналогичный понижению температуры осушенного сырьевого газа. При полном превращении выходного потока ребойлера в газовую фазу, температура в кубе колонны достигает критического значения (-53°C) циркуляция флюида через ребойлер прекращается, и колонна захлебывается (рис. 7).

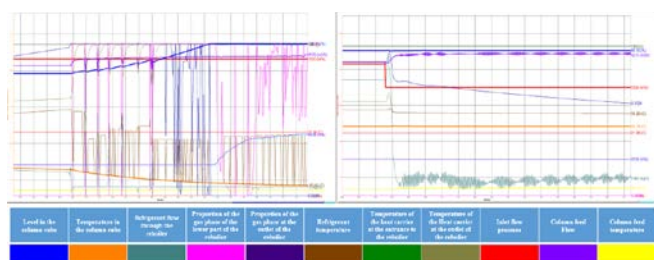


Рис. 7. Графики изменения технологических параметров колонны в результате изменения давления входного потока

При понижении давления осушенного сырьевого газа наблюдается увеличение температуры и уменьшение расхода питания колонны. Данные изменения приводят к уменьшению расхода флюида через ребойлер, однако температура в кубе колонны продолжает соответствовать заданному значению. С течением времени расход через ребойлер возвращается к предыдущему значению. При малых амплитудах уменьшения давления не наблюдалось ситуаций, которые могли бы привести к нештатным или аварийным ситуациям. При больших амплитудах уменьшения давления существует риск прекращения циркуляции флюида через ребойлер.

VIII. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ВХОДНОГО ПОТОКА

По результатам исследования определено, что понижение температуры питания колонны более чем на 1 градус с увеличением расхода питания более 20 тонн/ч является критическим, и может привести к нештатным или аварийным ситуациям.

Наиболее опасны случаи, когда одновременно уменьшается температура и давление или одновременно увеличивается температура и повышается давление осушенного сырьевого газа.

Случай с одновременным увеличением давления и уменьшением температуры осушенного сырьевого газа является наиболее опасным, поскольку в данном случае влияние каждого из параметров усиливается, вызывая большее понижение температуры питания колонны и увеличение расхода питания. Такое явление возможно на установке, когда возникают пульсации давления в нитке осушенного сырьевого газа.

IX. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДАЛЬНЕЙШАЯ РАЗРАБОТКА

Циркуляция через ребойлер прекращается при понижении температуры в кубе колонны ниже критической -53°C . В этом случае вся жидкая фаза в ребойлере превращается в газовую. Теплообменная секция полностью заполняется газовой фазой, а в трубе возврата от ребойлера находится жидкая фаза.

Рекомендуется не допускать избыточного подвода тепла к ребойлеру и избегать превращения выходного потока ребойлера целиком в газовую фазу. Следует контролировать мгновенную мощность ребойлера для предотвращения формирования газовых пробок.

При образовании газовой пробки рекомендуется перевести контур регулирования расхода теплоносителя ребойлера в ручной режим и ступенчато повышать тепловую нагрузку ребойлера, обеспечивая контролируемое повышение температуры кубовой части колонны и предотвращая повторное испарение углеводородного конденсата.

Важно не допускать снижения уровня в кубе колонны ректификации ниже критического значения 76% и падения температуры ниже минус 53°C с целью предотвращения остановки циркуляции флюида через ребойлер.

Рекомендуется следить за изменением давления и температуры входного потока с целью предотвращения затопления колонны. При этом рекомендуется использование каскадной системы регулирования давления верха с коррекцией по расходу питания для уменьшения пульсации давления и расхода питания.

При существенном падении уровня в кубе колонны возможно использование байпасной линии подачи питания в обход предохранителя под 9-ю тарелку для экстренного подогрева куба колонны. Однако степень воздействия регулятора расхода данной линии требует тонкой настройки. Оперативному персоналу не рекомендуется пользоваться данным регулятором при отсутствии отработанной программы действий при возникновении аварийной ситуации.

В целях обеспечения стабильной температуры газа, поступающего в сепаратор, а также для поддержания температуры питания колонны, необходимо осуществлять регулирование теплового режима входного потока. В качестве регулируемого параметра выбирается температура газа после теплообменника, управляемая каскадной системой регулирования с внешним регулятором температуры ТС-7 и внутренним регулятором расхода FC-7, управляющим распределением потока теплоносителя между основной и байпасной линиями предохранителя.

Для уменьшения инерционности обнаружения остановки циркуляции флюида через ребойлер рекомендуется рассмотреть установку датчика расхода в линию циркуляции флюида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Seidel T., Biegler L.T. Distillation Column Optimization: A formal method using stage-to stage computations and distributed streams // Chemical Engineering Science. 2024. С. 120875.
- [2] Миллер А.Б., Селезнев К.Г., Крылов П.В. [и др.]. Сжиженный природный газ: технологии и оборудование. Москва: ООО "МАКС Пресс", 2024. 784 с. DOI 10.29003/m3814.978-5-317-07162-2. EDN LGUSCW.
- [3] Барашкин Р.Л., Попадью В.Е., Калашников П.К., Южанин В.В., Динамическое имитационное моделирование в решении задач проектирования систем управления объектов нефтегазовой

- [1] Seidel T., Biégler L.T. Distillation Column Optimization: A formal method using stage-to stage computations and distributed streams // Chemical Engineering Science. 2024. С. 120875.
- [2] Миллер А.Б., Селезнев К.Г., Крылов П.В. [и др.]. Сжиженный природный газ: технологии и оборудование. Москва: ООО "МАКС Пресс", 2024. 784 с. DOI 10.29003/m3814.978-5-317-07162-2. EDN LGUSCW.
- [3] Барашник Р.Л., Попадью В.Е., Калашников П.К., Южанин В.В., Динамическое имитационное моделирование в решении задач проектирования систем управления объектов нефтегазовой

- [4] Шевкунов С.Н. Адсорбционная осушка и низкотемпературная ректификация в процессах промышленной подготовки природного газа // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 7 (53). С. 28-31.
- [5] Барашкин Р.Л. Проектирование систем управления ректификационными колоннами: учеб.-метод. Пособие. М.: Изд-во ИЦ РГУ нефти и газа имени ИМ Губкина. 2014.
- [6] Murthy Konda N.V.S.N., Rangaiah G.P., Krishnaswamy P.R. A simple and effective procedure for control degrees of freedom // Chemical Engineering Science, 2006.
- [7] Tsekhemstruk I.B., Barashkin R.L., Popadko V.E. Relative Gain Array Application for Typical Chemical Process / IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Novosibirsk, Yekaterinburg, 11–13 ноября 2022 года. Novosibirsk, Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2022. P. 1770-1773. – DOI 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017013. – EDN BVKQNI.
- [8] Хабибуллина А.Ф., Федосеев П.О., Барашкин Р.Л. Определение числа степеней свободы системы управления на примере блока первой ступени сепарации // Нефть и газ - 2020: Сборник трудов 74-й Международной молодежной научной конференции, Москва, 28 сентября – 04.2020 года. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2020. С. 387-396. – EDN EVYFUQ.
- [9] Барашкин Р.Л., Попадько В.Е., Антипов О.Д., Коновалов С.О., Применение имитационного моделирования для синтеза структуры системы автоматического управления многосвязным объектом на примере установки комплексной подготовки газа. Территория нефтегаз, ноябрь 2015, 22-28.
- [10] Барашкин Р. Л., Попадько В.Е., Проектирование и сравнительный анализ структур системы управления на примере блока предварительной сепарации газа // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2022. Т. 1. С. 60-63. EDN AAUXZW.
- [11] Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Вклад ленинградских ученых в развитие теории чувствительности систем управления // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 2(25). С. 5-34.
- [12] Панкрушина А.В. Моделирование процессов в сложных ректификационных комплексах при разработке технологии разделения кремнийорганических продуктов: дис. ... канд. техн. наук / М.: ПХТУ им. Д.И. Менделеева, 2019. 165 с.
- [13] Shin Y., Smith R., Hwang S. Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column // Journal of Cleaner Production. 2020. Т. 277. С. 124124.