

УДК 681.5

DOI 10.17513/snt.40147

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ АБСОРБЦИИ

Сутягин Д.К., Кечкина Н.И.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: dmitriy.sutiagin@gmail.com, nataliyakechkina@yandex.ru

В статье проводится анализ процесса непрерывной абсорбции как объекта управления. Для достижения этой цели была разработана математическая модель с использованием аналитического метода, что, в свою очередь, позволило выделить регулируемые параметры процесса, а также определить возможные управляющие и возмущающие воздействия. В качестве возмущающих факторов рассматриваются внешние контролируемые возмущения, связанные с изменением характеристик входящих в аппарат потоков. Стоит отметить, что при разработке математической модели формулируется ряд допущений, исключающих из рассмотрения малозначимые явления и процессы. Разработанное математическое описание было положено в основу приложения. Приложение позволяет оценить влияние различных возмущающих воздействий на показатели эффективности процесса абсорбции. Существует возможность реализации как одного, так и нескольких возмущающих воздействий одновременно. По результатам расчета строится график, демонстрирующий процесс изменения во времени выходной переменной, вызванный ступенчатым входным воздействием. Данное приложение дает возможность продемонстрировать и оценить степень влияния тех или иных возмущающих воздействий. Данная информация может быть использована для выбора структуры автоматической системы регулирования технологических параметров в рассматриваемом процессе. Приложение предлагается использовать для выполнения лабораторных, практических работ по дисциплине «Автоматизация технологических процессов и производств».

Ключевые слова: система автоматизации, объект управления, регулируемые параметры, возмущающие воздействия, абсорбция

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR THE STUDY OF THE CONTINUOUS ABSORPTION PROCESS

Sutyagin D.K., Kechkina N.I.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: dmitriy.sutiagin@gmail.com, nataliyakechkina@yandex.ru

The article considers the analysis of the continuous absorption process as a control object. To achieve this goal, a mathematical model was built using an analytical method, which, in turn, made it possible to specify the controlled parameters of the process, as well as to determine possible control and disturbing effects. External controlled disturbances associated with changes in the characteristics of the flows entering the device are considered as disturbing effects. It is worth noting that when developing a mathematical model, a number of assumptions are formulated that exclude insignificant phenomena and processes from consideration. The developed mathematical description was used as the basis for the application. The application allows you to evaluate the impact of various disturbing effects on the efficiency indicators of the absorption process. It is possible to implement both one and several disturbing effects simultaneously. Based on the calculation results, a graph is constructed demonstrating the process of change in time of the output variable caused by a step input effect. This application makes it possible to demonstrate and evaluate the degree of influence of certain disturbing effects. This information can be used to select the structure of an automatic control system for process parameters in the process under consideration. The application is proposed to be used for performing laboratory and practical work on the subject "Automation of technological processes and production".

Keywords: automation system, control object, adjustable parameters, disturbing effects, absorption

Введение

Автоматизация технологического процесса представляет собой набор методов и средств, предназначенных для реализации системы или систем, обеспечивающих управление технологическим процессом без непосредственного участия человека или с минимальным вмешательством, оставлением за человеком права принятия наиболее ответственных решений [1, с. 17].

Эффективность реализации технологических процессов во многом определяется корректностью постановки задач

автоматизации, выбором регулируемых технологических параметров и управляющих воздействий, а также определением возмущающих воздействий, алгоритмов контроля, оптимального управления и способов представления информации персоналу.

Целью исследования является анализ процесса как объекта управления, составление математической модели объекта аналитическим методом, исследование степени влияния возмущающих воздействий на показатели процесса.

Материалы и методы исследования

Химико-технологические процессы в большинстве случаев являются многомерными объектами управления, то есть характеризуются значительным количеством выходных параметров. С целью поддержания нормального технологического режима необходимо определить перечень параметров, значения которых требуется поддерживать в заданных технологическим регламентом диапазонах. Отметим, что при управлении процессом особое внимание следует обратить на потенциально возможные внешние возмущающие воздействия. Они нередко проявляются в виде ступенчатых изменений, характеризующихся значительной амплитудой, и в ряде случаев могут быть устранены до воздействия на объект [2, с. 7].

Важным этапом при реализации автоматизации технологических процессов является анализ всего процесса или процессов, протекающих в наиболее значимых аппаратах, как объектов управления. Основная цель анализа – определение управляемых параметров и выявление наиболее критичных возмущающих воздействий, выводящих систему из стабильного устойчивого состояния. Анализ технологического процесса как объекта управления, то есть определение возможных управля-

ющих и возмущающих воздействий, выполнен на основе уравнений полученной математической модели [3].

Математическое описание представляет собой отражение физической природы процесса со свойственными ему чертами и ограничениями [4, с. 17]. В данной статье изложены зависимости между технологическими параметрами процесса непрерывной абсорбции, которые основаны на теоретическом анализе физических и химических процессов, происходящих в объекте. Это позволило разработать математическую модель с использованием аналитического метода.

Абсорбция представляет собой массообменный процесс, который заключается в поглощении определенных компонентов исходной газовой смеси при ее взаимодействии с жидкостью, абсорбентом [5, с. 38; 6]. В данной статье рассматривается пример, в котором объектом автоматизации является абсорбционная установка (рис. 1). Абсорбционная установка представлена рядом аппаратов: абсорбционной колонной, холодильниками на линиях подачи исходной газовой смеси и абсорбента. Показателем эффективности процесса может являться доля извлекаемого компонента в обедненной смеси или насыщенном абсорбенте.

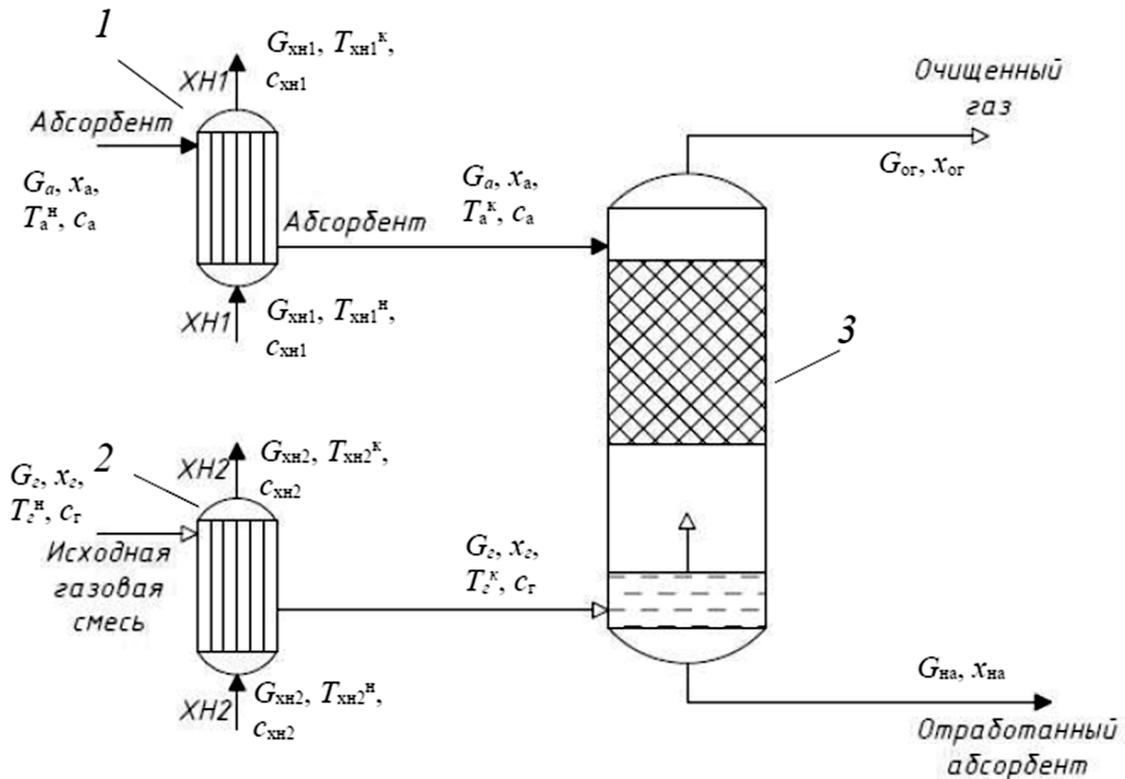


Рис. 1. Схема абсорбционной установки: 1, 2 – холодильники для охлаждения абсорбента и исходной газовой смеси соответственно, 3 – абсорбционная колонна

Реальные системы достаточно сложно представить в виде математических уравнений. Для рассмотрения наиболее значимых процессов и явлений требуется исключить малозначимые зависимости между технологическими параметрами. Для этого предложено принять упрощающие допущения для рассматриваемого процесса абсорбции:

1. Теплофизические свойства входящих потоков, выходящего потока и жидкости внутри аппарата идентичны и не зависят от температуры.

2. Потерями вещества и энергии во внешнюю среду пренебрегают.

3. Основные переменные процесса изменяются во времени, но остаются неизменными в пространстве, то есть рассматривается математическая модель с сосредоточенными параметрами.

Математическая модель процесса абсорбции для случая, когда показателем эффективности является доля извлекаемого компонента в жидкой фазе, с учетом начальных условий представлена формулой

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{na} S_{ann} h_{na} \frac{dx_{na}}{dt} = G_a x_a - G_{na} x_{na} + M_z^{na} \\ \rho_{na} S_{ann} \frac{dh_{na}}{dt} = G_a - G_{na} + M_z^{na} \\ \frac{V_{oz} M_{oz}}{RT_{oz}} \frac{dP_{oz}}{dt} = G_z - G_{oz} - M_z^{na} \\ G_a = \frac{(G_{na} x_{na} - M_z^{na})}{x_a}, \quad x_{na}|_{t=0} = x_{na}^{zad} \\ G_{na} = G_a + M_z^{na}, \quad h_{na}|_{t=0} = h_{na}^{zad} \\ G_z = G_{oz} + M_z^{na}, \quad P_{oz}|_{t=0} = P_{oz}^{zad} \end{array} \right., \quad (1)$$

где ρ_{na} – плотность насыщенного абсорбента, кг/м³; S_{ann} – площадь поперечного сечения аппарата, м²; h_{na} – уровень насыщенного абсорбента в аппарате, м; x_a, x_{na} – концентрации абсорбента и отработанного абсорбента соответственно; G_a, G_{na} – массовые расходы абсорбента и отработанного абсорбента соответственно, кг/ч; M_z^{na} – масса целевого компонента, переходящая из газовой фазы в жидкую в единицу времени, кг/ч; M_{oz} – молярная масса обедненной газовой смеси, кг/моль; V_{oz} – объем газовой фазы в колонне, м³; R – универсальная газовая постоянная; T_{oz} – температура в колонне (по газовой фазе), К; P_{oz} – давление в колонне, Па; G_z, G_{oz} – исходной газовой смеси и обедненной газовой смеси соответственно, кг/ч.

Математическая модель процесса абсорбции, в которой в качестве показателя

эффективности является доля извлекаемого компонента в газовой фазе, с учетом начальных условий представлена формулой

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{na} S_{ann} (h_{ann} - h_{na}) \frac{dx_{oz}}{dt} = G_z x_z - G_{oz} x_{oz} - M_z^{na} \\ \rho_{na} S_{ann} \frac{dh_{na}}{dt} = G_a - G_{na} + M_z^{na} \\ \frac{V_{oz} M_{oz}}{RT_{oz}} \frac{dP_{oz}}{dt} = G_z - G_{oz} - M_z^{na} \\ G_z = \frac{(G_{oz} x_{oz} + M_z^{na})}{x_z}, \quad x_{oz}|_{t=0} = x_{oz}^{zad} \\ G_{na} = G_a + M_z^{na}, \quad h_{na}|_{t=0} = h_{na}^{zad} \\ G_z = G_{oz} + M_z^{na}, \quad P_{oz}|_{t=0} = P_{oz}^{zad} \end{array} \right., \quad (2)$$

где h_{ann} – высота аппарата, м; x_z, x_{oz} – доля извлекаемого компонента в исходном и очищенном газе соответственно.

Представленные математические модели (формулы (1), (2)) позволяют учесть и оценить влияния изменений технологических параметров входящих в аппарат потоков на показатели эффективности процесса.

На основе уравнений математических моделей (формулы (1), (2)), для разных показателей эффективности процесса, были разработаны информационные схемы объекта управления (рис. 2, а, б). Информационные схемы отражают взаимосвязь между управляемыми технологическими параметрами, возможными управляющими и наиболее критичными возмущающими воздействиями.

На рис. 2 приняты обозначения, используемые в формулах (1), (2), а также L_{na} – уровень обработанного абсорбента в колонне.

Математическая модель процесса, проходящего в аппаратах абсорбционной установки, была положена в основу алгоритма программы. Назначение разработанной программы заключается в осуществлении оценки степени влияния возможных возмущающих воздействий на показатели эффективности процесса. Программа является универсальной и может быть применена для анализа любого технологического процесса, в котором присутствует абсорбция. При этом требуется внести исходные данные в соответствии с материальным балансом производства.

Приложение разработано на высокоуровневом языке программирования Python. Для его реализации и функционирования используются следующие модули: PySim-

pleGUI – для реализации графического интерфейса; NumPy – для реализации математической модели; Matplotlib – для реализации графиков кривой разгона и возмущающих воздействий; SciPy – для реализации ступенчатого графика.

Приложение разработано на основе модульного принципа. Структура представлена на рис. 3. В структуре приложения можно выделить четыре основные группы функций, позволяющих:

- описать исходные значения для функционирования математической модели (например, G_{na}, x_a), служебные переменные и списки (`events_cbvv`, `events_invv`, `vv_db`),

а также формулы для расчета расходов обедненной газовой смеси G_{og} и абсорбента G_a ;

- выполнить построение и вывод графиков, например функции `create_plot`, `create_step`, `draw_figure_w_toolbar` и класс `Toolbar`;

- описать графическую составляющую программы: ввод переменных для элементов программы, описание расположения элементов по окну приложения, реализация управления элементами окна;

- вспомогательные функции, например описание метода выхода из приложения и завершения работы и т.д.

Графический интерфейс разработанного приложения представлен на рис. 4.

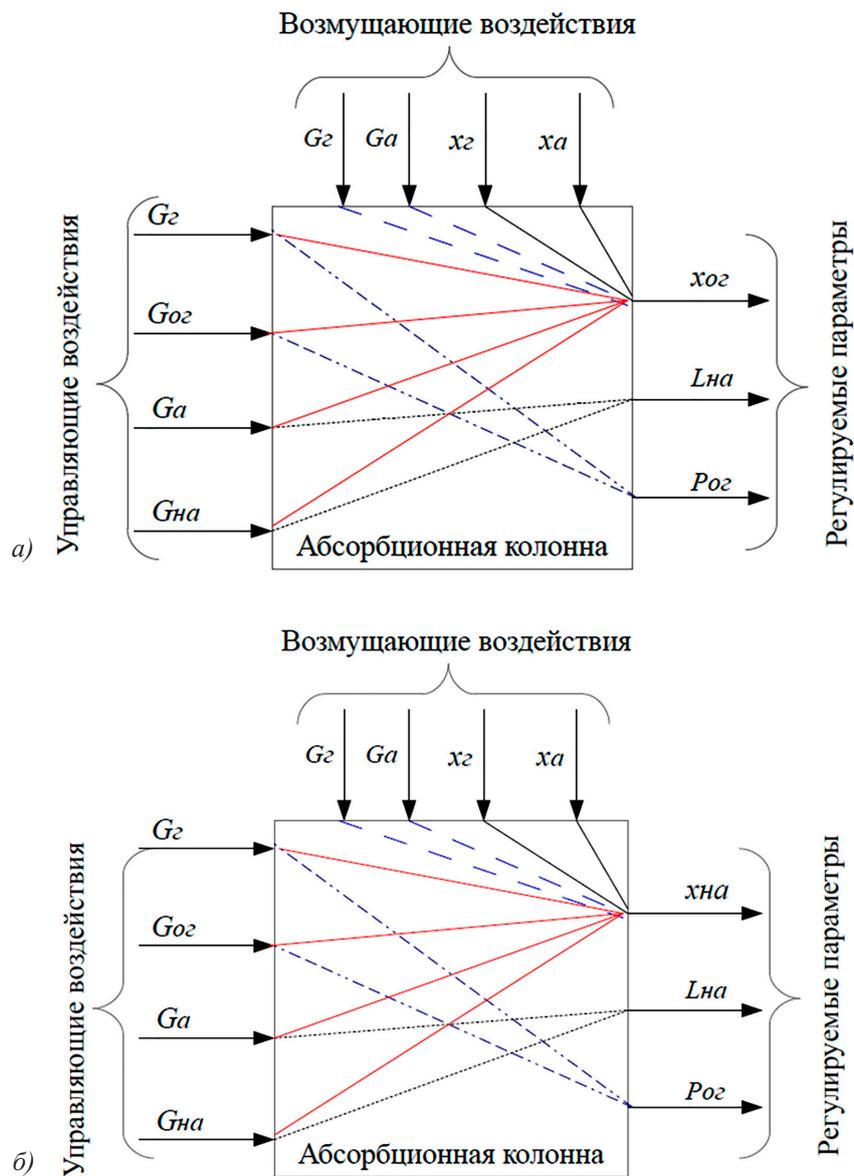


Рис. 2. Информационные схемы объекта управления для показателя эффективности:
 а – доля извлекаемого компонента в обедненной газовой смеси;
 б – доля извлекаемого компонента в отработанном абсорбенте

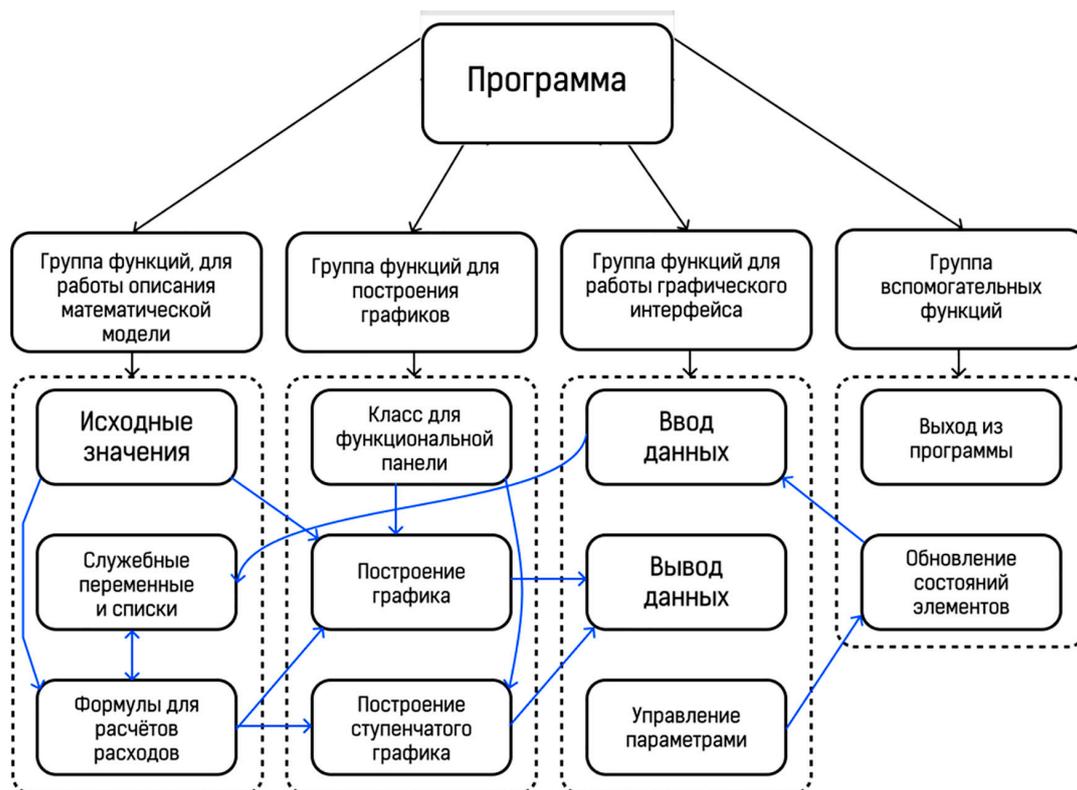


Рис. 3. Структура приложения

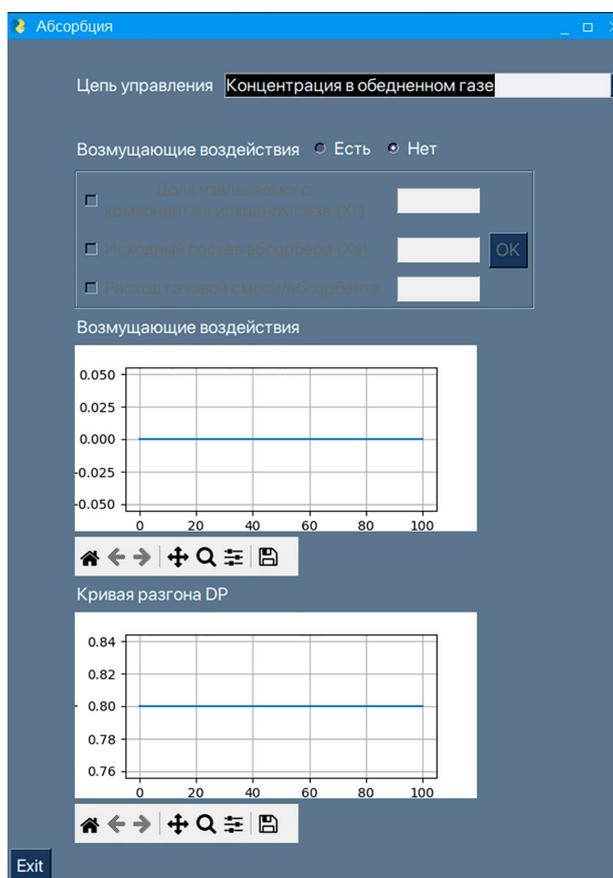


Рис. 4. Графический интерфейс программы

Приложение позволяет исследовать влияние возмущающих воздействий при различных значениях эффективности процесса. Внедрена возможность выбора цепи управления: достижение заданного значения доли извлекаемого компонента в обедненной смеси или в насыщенном абсорбенте. При этом отображаются следующие характеристики: обновляется видимость и активность элементов программы; построение графиков изменения возмущающего воздействия и кривой разгона.

Возможен выбор нескольких вариантов моделирования: в отсутствие возмущающих воздействий или при их наличии. В случае присутствия возмущающих воздействий становятся активными поля для указания их изменения в соответствии с выбранным показателем эффективности процесса. Например, если в качестве цепи управления выбрать «Концентрация извлекаемого компонента в обедненной смеси», то среди перечня возмущающих воздействий стано-

вятся активными «Концентрация извлекаемого компонента в исходном газе» и «Расход исходной газовой смеси». После выбора возмущающих воздействий пользователю предоставляется возможность указать численное значение изменения воздействий в процентном отношении и использовать эти значения в дальнейших расчетах и для построения графиков. С целью реализации ввода корректной информации в программном коде описана проверка вводимых пользователем значений.

После ввода корректной информации в поля для указания значений возмущающих воздействий, осуществляется выбор формулы для расчета итогового значения возмущения. Далее происходит построение графика изменения возмущающих воздействий, имеющего ступенчатый вид.

Перед построением графика кривой разгона указывается функция зависимости показателя эффективности процесса абсорбции от значений входных параметров.

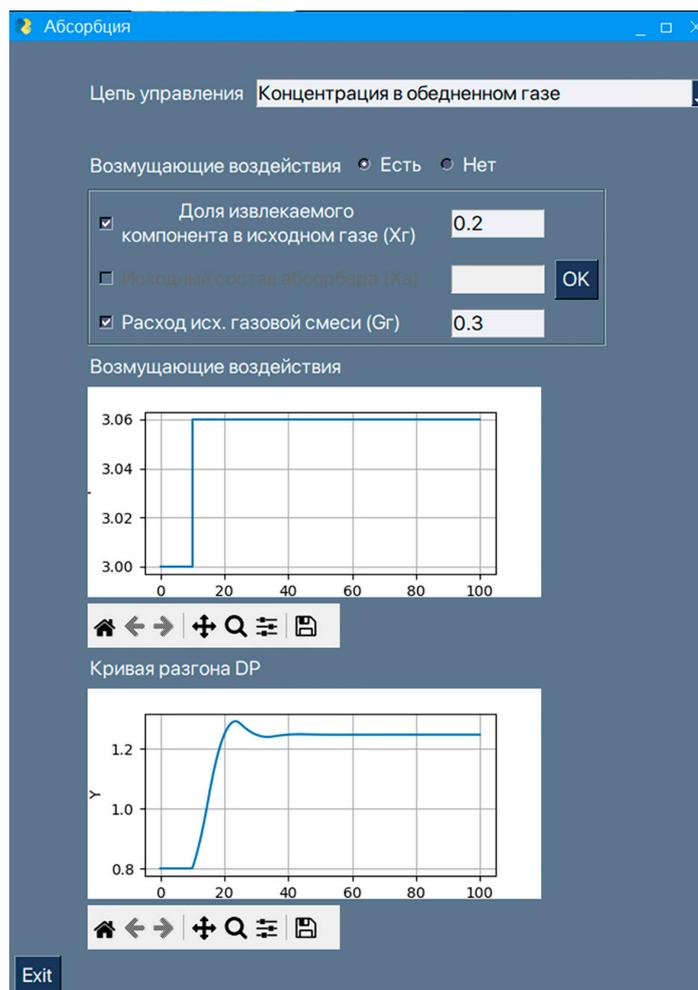


Рис. 5. Построение графиков при влиянии возмущающих воздействий

Для показателя эффективности «Концентрация извлекаемого компонента в очищенном газе» формула будет иметь следующий вид

$$x_{oz} = \frac{G_z(1 + K_{G_z})}{G_{oz}}(x_z(1 + K_{X_z})), \quad (3)$$

где K_{G_z} и K_{X_z} – коэффициенты изменения возмущающих воздействий (значение 0–1).

Для показателя эффективности «Концентрация извлекаемого компонента в насыщенный абсорбенте» формула выглядит следующим образом:

$$x_{na} = \frac{G_a(1 + K_{G_{na}})}{G_{na}}(x_a(1 + K_{X_a})), \quad (4)$$

где $K_{G_{na}}$ и K_{X_a} – коэффициенты изменения возмущающих воздействий (значение 0–1).

В условиях эксплуатации на объект управления воздействуют различные возмущения и динамический режим работы объектов становится характерным [7, с. 56]. Результат влияния указанных возмущающих воздействий представлен на рис. 5.

Заключение

Разработанное приложение представляет возможность в достаточной степени изучить технологический объект управления, условия эксплуатации и степень влияния внешних воздействий на показатели процесса. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для синтеза рациональной структуры си-

стемы автоматического регулирования (для конкретного технологического процесса): определения основных и вспомогательных регулируемых параметров; определения возмущающих воздействий и их влияния на показатели процесса; принятия решения о необходимости реализации регулирования по сложным схемам с компенсацией возмущающих воздействий.

Список литературы

1. Яхонтова И.М., Крамаренко Т.А. Информационные технологии в науке, производстве и образовании: учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2020. 122 с.
2. Молдабаева М.Н. Автоматизация технологических процессов и производств: учебное пособие. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 224 с.
3. Федоров О.С., Корчагин И.В. Математическое моделирование химико-технологических процессов: история становления и влияния на процесс исследования химико-технологических процессов // *Аллея науки*. 2023. № 11 (86). С. 707–710.
4. Кафоров В.В., Ветохин В.Н. Основы построения операционных систем в химической технологии. М.: Наука, 1980. 429 с.
5. Мончарж Э.М. Е.Г. Наумова, Н.А. Нажимова, Н.О. Кулигина. Управление технологическими процессами и производствами. Комплексная разработка систем управления: учебное пособие. Н. Новгород: НГТУ им. П. Е. Алексеева, 2020. 122 с.
6. Гафнер Ю.Я., Рыжкова Д.А. Анализ абсорбционных процессов поверхности нанокompактированного газового сенсора // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023. № 15. С. 395–403.
7. Волкова Г.В., Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Практикум по основам анализа технологических процессов как объектов управления: учебное пособие. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2018. 121 с.