МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

MODELING AND CALCULATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

В. Д. Кондратьева
V. D. Kondratyeva

Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University, Branch,
Sterlitamak, Russian Federation

Н. С. Шулаев
E. A. Shulaev

Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological
University, Branch,
Salavat, Russian Federation

Е. А. Шулаева
N. S. Shulaeva

Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University, Branch,
Sterlitamak, Russian Federation

И. В. Прахов
I. V. Prakhov

Уфимский государственный нефтяной
технический университет, филиал,
г. Салават, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological
University, Branch,
Salavat, Russian Federation

В представленной работе рассматривается моделирование процесса охлаждения дихлорэтана водой. Приводится описание математической модели объекта, в соответствии с которой был разработан компьютерный тренажер «Моделирование и расчет теплообменной аппаратуры». Тренажер включает в себя: моделирование процесса охлаждения дихлорэтана; 2D модель объекта; технологический калькулятор, позволяющий определять основные параметры теплообменника: массовый расход воды, тепловую нагрузку, сечение межтрубного пространства и т.д.; пример выполнения расчета; варианты заданий и общие сведения. Для заданного расхода и температуры были определены основные параметры теплообменного аппарата, обеспечивающие его оптимальную работу. Результаты вычислений технологического калькулятора совпадают с измеряемыми технологическими параметрами. Предлагаемый компьютерный тренажер может быть использован студентами и преподавателями в учебном процессе по дисциплинам «Процессы и аппараты химической технологии», «Моделирование систем и процессов» и др., а также для инженерных расчетов технологических параметров и подбора теплообменной аппаратуры.

The process simulation of dichloroethane cooling by water is considered. There given the description of the object mathematical model, on the basis of which a computer simulator «Modeling and calculation of heat exchange equipment» was developed. The simulator comprises: modeling of dichloroethane cooling process; 2D model; technological calculator allowing to define the main parameters of heat exchanger: mass flow rate of water, heat load, cross section of the annulus, etc.; example of calculation; variants of tasks and general information. For a given flow rate and temperature there were defined the main parameters of the heat exchanger, ensuring its optimal performance. The calculation results of the technological calculator coincide with the measured process parameters. The proposed computer simulator can be used by students and teachers in educational process in disciplines «Processes and devices of chemical technology», «Modeling of systems and processes» etc., as well as for engineering calculations of technological parameters and selection of heat exchange equipment.

Ключевые слова

математическое моделирование, модель объекта, технологический калькулятор, теплообменная аппаратура, холодильник, подогреватель, компьютерный тренажер

Key words

mathematical modeling, object model, technological calculator, heat exchange equipment, refrigerator, heater, simulator

Совершенствование методики преподавания специальных дисциплин студентов и инженерно-технического персонала — залог успешной деятельности любого предприятия. Для этих целей разрабатываются и внедряются различные системы обучения как для оценки текущего уровня подготовки, так и для его повышения. Наиболее распространены такие виды обучения, как инструктажи, тренинги, мастер-классы, обучение с применением компьютерных тренажеров и стендов.

В настоящее время подготовка инженерно-технических работников во многих отраслях осуществляется с помощью компьютерных тренажерных комплексов, поскольку обучение персонала на технологических установках сопряжено с большими материальными затратами и повышенным риском возникновения аварийных ситуаций.

Следовательно, разработка и внедрение компьютерных тренажеров на предприятиях и в высших учебных заведениях как эффективных средств обучения для повышения уровня квалификации персонала и обучения студентов является актуальной задачей.

В представленной работе приводится описание компьютерного тренажера «Моделирование и расчет теплообменной аппаратуры». Разработана математическая модель объекта, в соответствии с которой происходит имитация теплообменного процесса на примере охлаждения дихлорэтана.

Для заданного расхода и температуры были определены основные параметры теплообменного аппарата, обеспечивающие его оптимальную работу.

Определили тепловую нагрузку аппарата:

$$Q = G_{\text{дхэ}} \cdot c_{\text{дхэ}} \cdot (t_n - t_k) = 4,17 \cdot 1521 \cdot (93 - 27) = 418610 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $G_{\text{дхэ}}$ — массовый расход дихлорэтана;

$c_{\text{дхэ}}$ — удельная теплоемкость дихлорэтана;

t_n — начальная температура;

t_k — конечная температура.

Приняли решение использовать несколько последовательно соединенных аппаратов с поверхностью теплообмена $F = 9 \text{ м}^2$, длина труб $l_{\text{тр}} = 3 \text{ м}$, диаметр трубы $d_H \cdot \delta = 25 \cdot 2 \text{ мм}$; число ходов $n_x = 1$; площадь сечения труб $S_{\text{тр}} = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; площадь сечения между перегородками $S_m = 1,11 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, в вырезе пере-

городки $S_0 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; расположение труб — шахматное.

Рассчитали коэффициент теплопередачи, оценили температуры стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей, уточнили значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Коэффициент теплоотдачи от дихлорэтана:

$$\alpha_{\text{дхэ}} = \frac{Nu_{\text{дхэ}} \lambda_{\text{дхэ}}}{d_n} = 861 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \quad (2)$$

где d_n — наружный диаметр труб.

Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{дхэ}}} + R_{\text{дхэ}} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + R_B + \frac{1}{\alpha_B}} = 459 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{дхэ}}$ — теплопроводность дихлорэтана;

$\alpha_{\text{дхэ}}$ — коэффициент теплоотдачи от дихлорэтана;

$R_{\text{дхэ}}$ — термическое сопротивление загрязнений со стороны дихлорэтана.

Определили температуры стенки со стороны дихлорэтана $t_{\text{СТ1}}$ и со стороны воды $t_{\text{СТ2}}$, исходя из равенства удельных тепловых нагрузок:

$$K \cdot \Delta t_{\text{cp}} = \alpha_{\text{дхэ}} \cdot (t_{\text{ср дхэ}} - t_{\text{СТ1}}) = \alpha_w \cdot (t_{\text{СТ2}} - t_{\text{ср в}});$$

$$t_{\text{СТ1}} = t_{\text{ср дхэ}} - \frac{K \cdot \Delta t_{\text{cp}}}{\alpha_{\text{дхэ}}} = 60 - 461 \cdot \frac{27}{861} = 46^\circ \text{C}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{дхэ}}$ — коэффициент теплоотдачи от дихлорэтана;

K — коэффициент теплопередачи.

Уточненный коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{дхэ}}} + R_{\text{дхэ}} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + R_s + \frac{1}{\alpha_w}} = 456 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \quad (5)$$

где $\alpha_w = 2968 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ — уточненный коэффициент теплоотдачи к воде;

$\alpha_{\text{дхэ}} = 842 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ — уточненный коэффициент теплоотдачи от дихлорэтана;

$\frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}}$ — термическое сопротивление передающей стенки из стали 1Х18Н9Т.

Необходимая поверхность теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{418610}{456 \cdot 27} = 34 \text{ м}^2, \quad (6)$$

где Q — тепловая нагрузка аппарата;

K — уточненный коэффициент теплопередачи.

Приняли четыре последовательно соединенных теплообменника с поверхностью $F = 9 \text{ м}^2$.

Гидравлическое сопротивление трубного пространства четырех последовательно соединенных секций:

$$\Delta P_{TP} = 4 \lambda_{TP} \left(\frac{l_{TP}}{d} + \sum \zeta_{MC} \right) \frac{\rho_B w_B^2}{2} = 4533 \text{ Па}, \quad (7)$$

$$\text{где } \lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left(E + \frac{68}{Re_B} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_s} + \frac{68}{Re_B} \right)^{0,25} = 0,05.$$

Гидравлическое сопротивление межтрубного пространства четырех последовательно соединенных секций:

$$\Delta P_{MTP} = 4 \cdot \lambda_{MTP} \times \times \left(\frac{D \cdot (n_{TP} + 1)}{d_s} \cdot \frac{\rho_{\partial x} \cdot W^2}{2} \right) = 17250 \text{ Па}, \quad (8)$$

$$\text{где } d_s = \frac{4 \cdot (0,86 \cdot t^2 - \frac{\pi d_H^2}{4})}{\pi d_H} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$\lambda_{MP} = 0,24.$$

$$Re_{MTP} = \frac{W_{\partial x} d_s \rho_{\partial x}}{\mu_{\partial x}} = 0,35 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1194}{0,51} \cdot 10^{-3} = 16388. \quad (9)$$

При нажатии команды «Запуск процесса» на главном окне программы (рисунок 2) запускается моделирование процесса охлаждения дихлорэтана в теплообменном аппарате.

Первым этапом является загрузка дихлорэтана и воды оборотной прямой до необходимого уровня. Открываются клапаны 1-1 и 1-2 и запускаются насосы Н-1-1 и Н-1-2.

При загрузке моделируются: увеличение расхода исходной смеси с отображением изменения параметра на регулирующем приборе FIRC-1-1; увеличение температуры воды оборотной прямой на регистрирующем приборе TRK-1-2 (рисунок 3).

Вторым этапом является загрузка дихлорэтана и воды оборотной прямой в теплообменный аппарат, где вода оборотная прямая подается в межтрубное пространство, охлаждает дихлорэтан и далее удаляется как вода оборотная обратная.

Температура дихлорэтана на входе в теплообменный аппарат при этом регистрируется прибором TRK-2. При подаче дихлорэтана моделируется: изменение температуры с ото-

Рисунок 1. Окно входа в программу

Рисунок 2. Главное окно программы

Рисунок 3. Первый этап процесса моделирования

бражением этого параметра на регистрирующем приборе TRK-2 (рисунок 4).

При достижении температур необходимого уровня начинается третий этап – процесс охлаждения и выгрузки дихлорэтана. При этом моделируется: изменение темпера-

туры дихлорэтана с отображением этого параметра на регистрирующем приборе TRK-3 (рисунок 5).

На рисунке 6 представлен отрезок программного кода для окна «Расчеты».

Рисунок 4. Второй этап процесса моделирования

Рисунок 5. Третий этап процесса моделирования

Рисунок 6. Отрезок программного кода для окна «Расчеты»

Выводы

Программный продукт — компьютерный тренажер «Моделирование и расчет теплообменной аппаратуры» — позволяет моделировать реальные теплообменные процессы на примере охлаждения дихлорэтана. Программный продукт создан в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0. Тренажер включает в себя: моделирование процесса охлаждения дихлорэтана; 2D модель объекта; технологический калькулятор, позволяющий определить все основные параметры теплообменника: массовый расход воды, тепловую

нагрузку, сечение межтрубного пространства и т. д.; пример выполнения расчета; варианты заданий и общие сведения.

Программа может быть использована в учебном процессе преподавателями и студентами при изучении дисциплин «Процессы и аппараты химической технологии», «Моделирование систем и процессов» и др. Также программа будет полезна в производстве с целью корректного расчета технологических параметров и подбора теплообменного оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шулаева Е.А., Шулаев Н.С., Коваленко Ю.Ф. Имитационно-моделирующий комплекс процесса полимеризации винилхлорида суспензионным способом // Бутлеровские сообщения. 2014. Т. 40, № 12. С. 126–132.
2. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S. Simulation and Modeling Software in Chemical Technology: Polymerization of Vinyl Chloride // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 581–584.
3. Шулаева Е.А., Коваленко Ю.Ф., Шулаев Н.С., Шарко А.В. Имитационно-моделирующий комплекс «Производство поливинилхлорида суспензионным способом. Стадия сушки и отсева ПВХ» // Научные исследования: от теории к практике: сб. матер. Внутривуз. науч.-практ. конф. 2015. С. 28–30.
4. Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С. Моделирование стадии обесхлоривания анолита при производстве соды каустической и хлора ртутным методом // Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: сб. матер. II Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 148–150.
5. Шулаева Е.А., Шулаев Н.С., Коваленко Ю.Ф. Температурная зависимость вольт-амперной характеристики электролизера в производстве едкого натра // Фундаментальные и прикладные исследования в тех-

нических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. 2015. С. 158–160.

REFERENCES

1. Shulaeva E.A., Shulaev N.S., Kovalenko Yu.F. [Simulation and Modeling Complex Polymerization Process of Vinyl Chloride Suspension Process]. *Butlerovskie soobshheniya — Butlerov Communications*, 2014, Vol. 40, No. 12, pp. 126–132. [in Russian].
2. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S. Simulation and Modeling Software in Chemical Technology: Polymerization of Vinyl Chloride. *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 1040, pp. 581–584.
3. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S., Sharco A.V. Imitatsionno-modeliruyushchii kompleks «Proizvodstvo polivinilkhlorda suspenzionnym sposobom. Stadiya sushki i rasseva PVKh» [Modelling a Complex «Production of Polyvinyl Chloride Suspension Method. Stage of Drying and Sieving PVC»]. *Materialy vnutrivuz. nauch.-prakt. konf. «Nauchnyye issledovaniya: ot teorii k praktike»* [Proc. of the Intra-University Sci.-Pract. Conf. «Research: from Theory to Practice»]. 2014, pp. 28–30. [in Russian].

4. Kovalenko Yu.F., Shulaeva E.A., Shulaev N.S. Modelirovanie stadii obeskhlorivaniya anolita pri proizvodstve sody kausticheskoi i khloro rtutnym metodom [Modeling Stage of Dechlorination of Anolyte in the Production of Caustic Soda and Chlorine by the Method of Mercury]. *Materialy II mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Avtomatizatsiya, energo- i resursosberezhenie v promyshlennom proizvodstve»* [Proc. II Int. Sci.-Tehn. Conf. «Automation, Energy and Resource Efficiency in Industrial Production»]. 2017, pp. 148–150. [in Russian].

5. Shulaeva E.A., Shulaev N.S., Kovalenko Yu.F. Temperaturnaya zavisimost' vol't-ampernoï kharakteristiki

elektrolizera v proizvodstve edkogo natra [The Temperature Dependence of the Current-Voltage Characteristics of the Cell in the Production of Caustic Soda]. *Materialy vsenos. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. uchastiem «Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v tehnikeskikh naukakh v usloviyakh perehoda predpriyatiy na importozameschenie: problemy i puti resheniya»* [Proc. All-Russian Sci.-Tehn. Conf. with International Participation «Fundamental and Applied Research in the Technical Sciences in the Transition of Enterprises for Import Substitution: Problems and Solutions»]. 2015, pp. 158–160. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Кондратьева В. Д., программист кафедры «Информатика, математика и физика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

V. D. Kondratyeva, Programmer of Informatics, Mathematics and Physics Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: kondratyeva1994@bk.ru

Шулаева Е. А., кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

E. A. Shulaeva, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automatic Technology and Information Systems Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: eshulaeva@mail.ru

Шулаев Н. С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика, математика и физика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

N. S. Shulaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Informatics, Mathematics and Physics Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: nshulayev@rambler.ru

Прахов И. В., кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Салават, Российская Федерация

I. V. Prakhov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: priwan@yandex.ru