

УДК 65.011.56

С.А. Власов¹, И.А. Вялых¹, А.О. Колыхматов²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²ООО "Промышленная кибернетика", Пермь

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ БАЗЫ ДАННЫХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассмотрена актуальность применения компьютерных тренажерных комплексов на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производствах, обусловленная требованиями промышленной безопасности. Приведено краткое описание состава и структуры типовых компьютерных тренажерных комплексов. Описана проблема «старения» компьютерных тренажерных комплексов, которая заключается в параметрических и структурных изменениях технологического процесса. Для решения проблемы «старения» предложен алгоритм адаптации математической модели технологического процесса, рассмотренный в предыдущих работах. Работа данного алгоритма заключается в создании статической модели технологического процесса, аналогичной существующей динамической модели в компьютерном тренажерном комплексе, с последующей адаптацией этой модели известными методами нелинейной оптимизации, с последующей подстановкой найденных коэффициентов в динамическую модель тренажера. Для периодической оперативной коррекции математической модели технологического процесса предложена модернизация этого алгоритма с использованием технологических данных из базы данных реального времени (БДРВ). Работа алгоритма заключается в создании статической модели, аналогичной существующей динамической модели тренажера, с последующей подстройкой режима по статической модели и данным реального времени, полученным с технологического объекта, с заданной периодичностью, с последующей подстановкой найденных коэффициентов в динамическую модель тренажера. Алгоритм позволяет поддерживать актуальное состояние компьютерного тренажерного комплекса, соответствующее реальному состоянию установки, автоматически подстраиваясь под параметрические изменения на технологическом объекте. Также в статье предложено дальнейшее развитие данной работы для создания системы прогнозирования на основе адаптированной математической модели компьютерного тренажерного комплекса.

Ключевые слова: нефтепереработка, химическая технология, компьютерный тренажерный комплекс, математическая модель, адаптация, база данных реального времени.

S.A. Vlasov¹, I.A. Vyalykh¹, A.O. Kolyhmatov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²LLC "Industrial cybernetics", Perm, Russian Federation

ADAPTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE COMPUTER SIMULATOR COMPLEX BASED ON THE REAL-TIME DATABASE

The article discusses the relevance of the use of computer simulator complexes in chemical, petrochemical and oil refining industries, conditioned by the requirements of industrial safety. A brief description of the composition and structure of typical computer simulators is given. The problem of the "aging" of computer simulators is described, which consists in parametric and structural changes in the technological process. To solve the problem of "aging", an algorithm for adapting the mathematical model of the technological process, considered in previous works, is proposed. The work of this algorithm is to create a static model of the technological process, similar to the existing dynamic model in the computer simulator complex, with the subsequent adaptation of this model by known methods of nonlinear optimization, with subsequent substitution of the coefficients found in the dynamic simulator model. For periodic operational correction of the mathematical model of the technological process, the modernization of this algorithm is proposed using real-time database. The work of the algorithm is to create a static model similar to the existing dynamic simulator model, with subsequent tuning of the mode according to the static model and the real-time data obtained from the process object, with a specified periodicity, and then substituting the coefficients found in the dynamic simulator model. The algorithm allows maintaining the current state of the computer simulator complex, corresponding to the real state of the installation, automatically adjusting to parametric changes at the technological object. Also, in the article, further development of this work is proposed to create a forecasting system based on the adapted mathematical model of a computer simulator complex.

Keywords: refining, chemical technology, computer simulator complex, mathematical model, adaptation, real-time database.

Большинство химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств является взрывопожароопасным [1]. Одним из условий обеспечения безопасного функционирования таких технологических объектов является наличие хорошо обученного, высококвалифицированного управляющего производством персонала [2].

Согласно действующим в Российской Федерации федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности на все технологические объекты I и II категорий взрывоопасности должен быть разработан компьютерный тренажерный комплекс (КТК), содержащий максимально приближенные к реальным условиям динамические модели процессов и систем управления для подготовки, обучения и контроля знаний, умений и навыков оперативного персонала при управлении технологическим процессом, в том числе на режимах

пуска и останова, смены технологического режима, а также в нестандартных и аварийных ситуациях [3].

Таким образом, практически каждая технологическая установка, эксплуатируемая на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях, имеет или в ближайшее время будет иметь КТК, включающий в свой состав высокоточные динамические математические модели технологического процесса и системы управления установки.

КТК охватывает все необходимые элементы оборудования технологического процесса (ТП), все позиции распределенной системы управления (PCY) и системы противоаварийной защиты (СПАЗ), а также контрольно-измерительное оборудование и исполнительные механизмы и устройства, показывающие и управляемые только по месту на технологическом оборудовании, необходимые для полноценного обучения оперативного персонала технологических установок [4–10].

КТК представляет собой две модели и интерфейсы операторов, соединенные между собой с помощью среды инструктора (рис. 1).

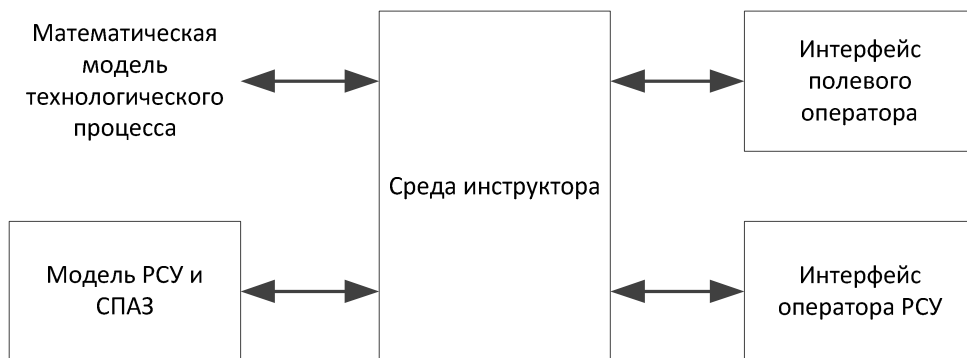


Рис. 1. Типовая структурная схема КТК

Математическая модель технологического процесса, имитирует и повторяет реальный технологический процесс, детально описываемый дифференциальными уравнениями теплового и материального баланса, уравнениями гидродинамики и химической кинетики. Моделирование проводится с учетом термодинамических свойств потоков и материалов оборудования, механических динамических характеристик клапанов, насосов и емкостей, химических превращений в аппаратах, потери тепла в окружающую среду, а также контрольно-измерительного оборудования.

Модель РСУ представляет собой полное повторение системы управления технологической установкой, включая систему ПАЗ и пользовательский интерфейс оператора, детально повторяющий реальную среду оператора РСУ.

Среда инструктора – компонент тренажера, который связывает эти две модели друг с другом через граничные переменные и позволяет сохранять промежуточные синхронизированные состояния математических моделей, например при пуске установки. Она обеспечивает синхронизацию моделей во времени, синхронизацию всей необходимой информации с моделями на интерфейсы полевого оператора и оператора РСУ, а также позволяет инструктору реализовывать нештатные ситуации и неисправности оборудования.

Интерфейс оператора РСУ выполняет функции в полном соответствии с реальной РСУ (включая мнемосхемы, тренды, другие элементы мониторинга и панели управления процессом) и отображает информацию о текущем состоянии модели, а также позволяет вести управление по позициям, соответствующим позициям оператора РСУ.

Интерфейс полевого оператора представляет собой интерактивную технологическую схему процесса, отображающую информацию о текущем состоянии модели по полевым позициям, и позволяет вести управление по этим позициям, а также отображает изменения с полевых приборов и визуализирует нештатные состояния технологического оборудования (пропуск трубопровода, и др.).

Однако динамическая модель технологического процесса, лежащая в основе компьютерного тренажерного комплекса, устаревает за счет параметрических («старение» оборудования, закоксовывание и запарафинивание труб и т.п.) и структурных (замена или добавление нового оборудования и приборов, изменение обвязки оборудования) изменений технологического процесса [11]. В связи с этим использование имеющейся модели для имитационного моделирования затруднено, и необходима адаптация модели к текущему режиму. Трудоемкость адаптации математических моделей РСУ и ТП инженером, разработавшим тренажер (т.е. знающим объект и модели технологического процесса и системы управления) на актуальный технологический режим составляет порядка 100–150 человеко-часов для установки, включающей порядка 2000 каналов измерения. Автоматизация процедуры адаптации позволяет использовать динамическую математическую модель

установки, включая технологический процесс и РСУ, с целью проверки предполагаемых решений по управлению технологической установкой, в том числе в темпе с технологическим процессом, например, для целей оценки правильности и целесообразности принятия операторами управленческих решений по корректировке текущего технологического режима. При этом, если позволяют вычислительные возможности сервера КТК, присутствует возможность ускорить процесс расчета, включающий синхронизированное ускорение расчета математических моделей РСУ и технологического процесса. Величина ускорения зависит от сложности математических моделей РСУ и технологического процесса, а также от вычислительных мощностей технического оснащения КТК. Максимальная скорость расчета может в разы превышать реальное время, что позволяет при имитационном моделировании прогнозировать принимаемые оперативным персоналом решения и видеть ускоренную реакцию объекта управления.

При автоматизации процедуры адаптации математической модели РСУ и технологического процесса возможна только параметрическая [12] адаптация, так как все структурные изменения ТП в модели необходимо осуществлять вручную.

Для периодической оперативной коррекции математической модели ТП предлагается модернизация алгоритма, предложенного в работах [13, 14] за счет использования технологических данных реального времени (рис. 2).

Из базы данных реального времени (БДРВ) по протоколам OPC DA (HDA), PI SDK, API и другим с заданной периодичностью данные о текущем и историческом состоянии установки (значения технологических параметров, результаты лабораторного контроля качественных характеристик сырья и продуктов ТП) передаются в статическую модель объекта (рис. 3). Эти данные устанавливаются как целевые значения в соответствующих материальных и энергетических потоках. После этого решается задача параметрической идентификации настроечных характеристик моделей аппаратов и динамического оборудования методами нелинейной оптимизации [15–20]. Далее идентифицированные параметры (коэффициенты) оборудования устанавливаются как настроечные коэффициенты аппаратов и оборудования в динамической модели КТК. После ожидания установившегося режима динамической модели проверяется достоверность найденных коэффициентов

в соответствии с критерием идентификации. Критерием задачи идентификации математической модели является минимум разницы между каждым измеряемым параметром в динамической модели и соответствующим параметром реального ТП.

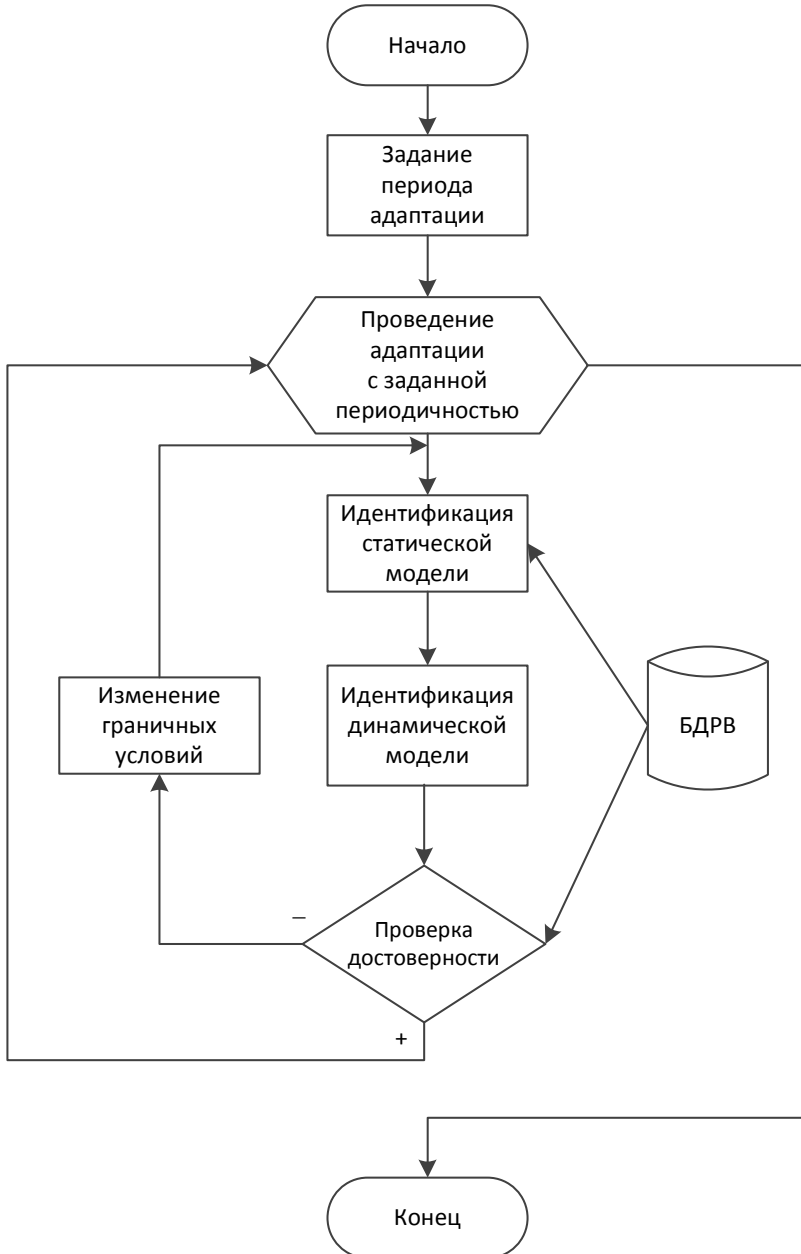


Рис. 2. Блок-схема алгоритма адаптации

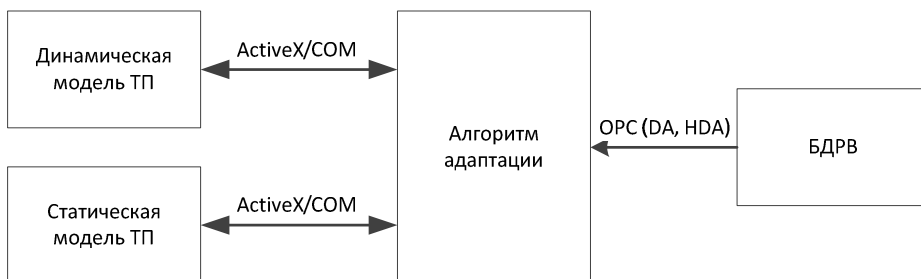


Рис. 3. Структурная схема работы алгоритма с учетом данных реального времени

Данный алгоритм позволит поддерживать актуальное состояние тренажерного комплекса, соответствующее реальному состоянию ТП. Поддержание модели установки в актуальном состоянии дает возможность разработки цифрового двойника технологической установки, дублирующего реальный объект управления в информационной и технологической составляющей. Наличие актуального КТК дает широкие возможности для применения методов имитационного моделирования с целью отработки принимаемых решений по управлению технологическим процессом, тестирования вновь создаваемых алгоритмов управления, в том числе APC-систем. При этом скорость реакции КТК на управляющие воздействия и вносимые возмущения может быть увеличена для отслеживания переходных процессов и достижения стационарного состояния за меньший период времени. При дальнейшей доработке возможна разработка на базе КТК электронного помощника, работающего в режиме советчика, предупреждая оператора установки о возможном развитии технологического режима и возможном возникновении неисправностей оборудования. Электронный помощник позволит своевременно принимать меры по предотвращению нештатных ситуаций.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 7 марта 2017 года). – 2017 // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
2. Tamas P., Szentgyörgyi Z., Nemes L. Computer operation: Operator facilities, education and satisfaction // Comput. Ind. – 1981. – Vol. 2, № 4. – P. 287–295. DOI: 10.1016/0166-3615(81)90076-2

3. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – 2013 // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

4. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. – М.: СИНТЕГ, 2009. – 372 с.

5. Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор / В.М. Дозорцев [и др.] // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 7. – С. 8–20.

6. Колыхматов А.О., Шумихин А.Г. Алгоритм оптимизации в задаче управления блоком подогрева сырой нефти на установке АВТ нефтеперерабатывающего предприятия с его актуализацией в компьютерно-тренажерном комплексе // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2015. – № 3. – С. 39–48.

7. Balaton M.G., Nagy L., Szeifert F. Operator Training Simulator Process Model Implementation of a Batch Processing Unit in a Packaged Simulation Software // Comput. Chem. Eng. – 2013. – Vol. 48. – С. 335–344. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.005

8. Colombo S., Golzio L. The Plant Simulator as viable means to prevent and manage risk through competencies management: Experiment results // Saf. Sci. Elsevier. – 2016. – Vol. 84. – P. 46–56. DOI: 10.1016/J.SSCI.2015.11.021

9. Gerlach I., Mandenius C.-F., Hass V.C. Operator training simulation for integrating cultivation and homogenisation in protein production // Biotechnol. Reports. Elsevier. – 2015. – Vol. 6. – P. 91–99. DOI: 10.1016/J.BTRE.2015.03.002

10. Duca M., Tamas L. Development of an Operation Training System – A Case Study // IFAC Proc. Vol. Elsevier. – 2012. – Vol. 45, № 6. – С. 1622–1627. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00225

11. Гальперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981. – 812 с.

12. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Параметрическая идентификация управляемого объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 19. – С. 102–110.

13. Власов С.А., Вялых И.А. Адаптация математической модели химико-технологического процесса на примере электрообессоливающей установки // Химия. Экология. Урбанистика: материалы всерос. науч.-практ. конф. молод. ученых, аспирантов, студ. и школьников (с междунар. участ.). – Пермь, 2017. – С. 466–471.

14. Власов С.А., Вялых И.А. Автоматическая адаптация математической модели компьютерного тренажерного комплекса электрообессоливающей установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 3. – С. 28–41. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.03

15. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. – Киев: Высшая школа, 1983. – 511 с.

16. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии: учеб. пособие для вузов. – М.: Химия, 1969. – 564 с.

17. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем: учеб. для вузов. – М.: Химия, 1991. – 432 с.

18. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ химической технологии. Топологический принцип формализации. – М.: Наука, 1979. – 394 с.

19. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 500 с.

20. On Optimization Methods for Deep Learning / Q.V. Le [et al.] // Proceedings of The 28th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2011. – С. 65–272. DOI: 10.1.1.220.8705

References

1. Federal'nyi zakon ot 21.07.1997 № 116-FZ “O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov” (s izmeneniiami na 7 marta 2017 goda), 2017 [Federal Law of 21.07.1997 № 116-FZ “On industrial safety of hazardous production facilities” (as amended on March 7, 2017)]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.

2. Tamas P., Szentgyörgyi Z., Nemes L. Computer operation: Operator facilities, education and satisfaction. *Comput. Ind.*, 1981. vol. 2, no. 4, pp. 287-295. DOI: 10.1016/0166-3615(81)90076-2

3. Obshchie pravila vzryvobezопасnosti dlia vzryvopozharoопасnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvaiushchikh proizvodstv: federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezопасnosti [Federal rules and regulations in the field of industrial safety "general rules of explosion safety for explosive chemical, petrochemical and oil refineries"], 2013. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

4. Dozortsev V.M. Komp'iuternye trenazhery dlia obucheniiia operatorov tekhnologicheskikh protsessov [Computer simulators for the training of operators of technological processes]. Moscow: SINTEG, 2009. 372 p.

5. Dozortsev V.M. [et al.]. Komp'iuternyi trening operatorov: neprekhodiashchaia aktual'nost', novye vozmozhnosti, chelovecheskii faktor [Computer training of operators: lasting relevance, new opportunities, human factor]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2015, no. 7, pp. 8-20.

6. Kolykhatov A.O., Shumikhin A.G. Algoritm optimizatsii v zadache upravleniia blokom podogreva syroi nefiti na ustanovke avt neftepererabatyvaiushchego predpriiatiia s ego aktualizatsiei v komp'iuterno-trenazhernom komplekse [Optimization algorithm in the task of managing the crude oil preheating unit at the refinery ABT plant with its actualization in the computer-simulator complex]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiia i biotekhnologiia*, 2015, no. 3, pp. 39-48.

7. Balaton M.G., Nagy L., Szeifert F. Operator Training Simulator Process Model Implementation of a Batch Processing Unit in a Packaged Simulation Software. *Comput. Chem. Eng.*, 2013, vol. 48, pp. 335-344. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.005

8. Colombo S., Golzio L. The Plant Simulator as viable means to prevent and manage risk through competencies management: Experiment results. *Saf. Sci. Elsevier*, 2016, vol. 84, pp. 46-56. DOI: 10.1016/J.SSCI.2015.11.021

9. Gerlach I., Mandenius C.-F., Hass V.C. Operator training simulation for integrating cultivation and homogenisation in protein production. *Biotechnol. Reports. Elsevier*, 2015, vol. 6, pp. 91-99. DOI: 10.1016/J.BTRE.2015.03.002

10. Duca M., Tamas L. Development of an Operation Training System – A Case Study. *IFAC Proc. Vol. Elsevier*, 2012, vol. 45, no. 6, pp. 1622-1627. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00225

11. Gal'perin N.I. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiia, 1981. 812 p.

12. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. Parametricheskaia identifikatsiia upravliaemogo ob"ekta v rezhime ego ekspluatatsii s primeneniem tekhnologii neuronnykh setei [Parametric identification of a controlled object in its operation mode using neural network technology]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2016, no. 19, pp. 102-110.

13. Vlasov S.A., Vialykh I.A. Adaptatsiia matematicheskoi modeli khimiko-tekhnologicheskogo protsessa na primere elektroobessolivaushchei ustanovki [Adaptation of the mathematical model of the chemical-technological process using the example of an electro-desalination unit]. *Materialy vs Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, studentov i shkol'nikov (s mezhdunarodnym uchastiem) "Khimii. Ekologiya. Urbanistika"*. Perm', 2017, pp. 466-471.

14. Vlasov S.A., Vialykh I.A. Avtomaticheskaiia adaptatsiia matematicheskoi modeli komp'yuternogo trenazhernogo kompleksa elektroobessolivaushchei ustanovki [Automatic adaptation of the mathematical model of the computer simulator of the electro-desalination unit]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2016, no. 3, pp. 28-41. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.03

15. Beiko I.V., Bublik B.N., Zin'ko P.N. Metody i algoritmy resheniia zadach optimizatsii [Methods and algorithms for solving optimization problems]. Kiev: Vysshaya shkola, 1983. 511 p.

16. Boiarinov A.I., Kafarov V.V. Metody optimizatsii v khimicheskoi tekhnologii [Methods of optimization in chemical technology]. Moscow: Khimiia, 1969. 564 p.

17. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Analiz i sintez khimiko-tekhnologicheskikh sistem [Analysis and synthesis of chemical-technological systems: educational for universities]. Moscow: Khimiia, 1991. 432 p.

18. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. Sistemnyi analiz khimicheskoi tekhnologii. Topologicheskii printsip formalizatsii [System analysis of chemical technology. The topological principle of formalization]. Moscow: Nauka, 1979. 394 p.

19. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Osnovy strategii [System analysis of the processes of chemical technology. Fundamentals of Strategy]. Moscow: Nauka, 1976. 500 p.

20. Le Q.V. [et al.] On Optimization Methods for Deep Learning. *Proceedings of The 28th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2011, pp. 65-272. DOI: 10.1.1.220.8705

Сведения об авторах

Власов Сергей Алексеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: savlasov@pstu.ru).

Вялых Илья Анатольевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: atp@pstu.ru).

Колыхматов Аркадий Олегович (Пермь, Россия) – руководитель группы системных разработок ООО «Промышленная кибернетика» (614990, Пермь, Луначарского, 85; e-mail: kolykhmatovao@gmail.com).

About the authors

Vlasov Sergey Alekseyevich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Automation Technological Processes Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: savlasov@pstu.ru).

Vjalyh Il'ja Anatolyevich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation Technological Processes Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: atp@pstu.ru).

Kolykhmatov Arkadii Olegovich (Perm, Russian Federation) is a head of the group of system development of LLC "Industrial Cybernetics" (614990, Perm, 85, Lunacharskogo, e-mail: kolykhmatovao@gmail.com).

Получено 08.10.2018