

УДК 004.62

Омар Муаяд Абдуллах, аспирант

Одесский национальный политехнический университет
проспект Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина
omarukrain@yahoo.com

СТРУКТУРА И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АНОМАЛЬНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрена актуальная научно-техническая проблема создания эффективных технологий реализации средств математического моделирования класса аномальных диффузионных процессов. При этом к сфере актуальных задач исследования аномальных диффузионных процессов следует также отнести и организацию самих исследований, в частности, построения информационной технологии реализации задач математического моделирования.

Предложена структура и инструментальные средства информационной технологии реализации задач математического моделирования аномальных диффузионных процессов в условиях нестационарности протекания последних.

Ключевые слова: информационная технология, инструментальные средства, математическое моделирование, аномальный диффузионный процесс, нестационарная задача.

Введение. Внедрение средств вычислительной техники (ВТ) в информационную сферу определило новый этап развития информационных технологий – это информационные технологии с «дружественным» интерфейсом работы пользователя. Для задач научных исследований и, в частности, математического моделирования наибольший интерес представляют технологии баз данных (БД), технологии программирования и технологии компьютерной графики. Данные технологии соответственно применяются при решении вопросов упорядоченного хранения информационных объектов и организации быстрого доступа к ним.

Цель работы – разработка структуры информационной технологии и комплекса инструментальных средств, ориентированных на решение задач математического моделирования нестационарных аномальных диффузионных процессов (формирование математической модели процесса и ее идентификация, а также моделирование динамики на основе сформированной модели).

Основная часть. Основной круг проблем, решаемых в ходе математического моделирования, составляют разработка математических моделей (ММ) изучаемых процессов, а также разработка вычислительных и численных методов реализации этих ММ. При этом исследуются, как правило, законы

сохранения (массы, энергии, импульса и т.д.), из которых выводятся уравнения динамики, начальных и граничных условий (суть – ММ); разрабатываются аналитические и численные методы решения полученных уравнений динамики, а также осуществляется анализ качественных свойств получаемых в результате решений (исследование существования, единственности, сходимости и точности решений; определение вычислительных затрат на реализацию решения; проведение тестирования предложенных ММ) [1].

Вместе с тем важными следует также признать вопросы, связанные с формой представления получаемых в ходе математического моделирования решений [2], в данном случае – применения информационных технологий (ИТ). Это связано с представлением, анализом и реализацией получаемых решений. Возникающие при этом проблемы состоят, в частности, в следующем. Так, в ряде важных прикладных случаев, в ходе математического моделирования, исследуемые диффузионные процессы (и, в частности, так называемые «аномальные» диффузионные процессы, протекание которых характеризуется нарушением описывающих их физических законов [1]) рассматриваются как процессы с распределенными параметрами (РП-процессы). Пространственная область РП-процессов при моделировании представляет-

ся конечномерной сеткой узлов или конечных элементов, а функция состояния – массивом значений сеточных функций в этих узлах (или функций в конечных элементах). В зависимости от требуемой точности решения получаемые массивы сеточных функций (функций в конечных элементах) имеют значительные размеры ($10^2 \dots 10^5$ значений). При таком количестве значений возможности интерпретации решений приобретают первостепенное значение (например, упорядочивание массивов значений и формы их представления, способы хранения и обращения, преобразования и т.д.).

Для эффективного решения указанного круга вопросов реализации средств математического моделирования аномальных диффузионных процессов была предложена информационная технология (ИТ) (рис. 1), в основу структуры которой положена триада «МОДЕЛЬ – АЛГОРИТМ – ПРОГРАММА» [3]. При такой структуре, рассматривая математическое моделирование во взаимосвязи с реализующими его ИТ, допустимо говорить об *информационно-математическом* моделировании (ИМ-моделировании), включающем в себя: сбор необходимой информации и составление информационной модели исследуемого процесса (объекта); обработку полученных данных (их организацию или структурирование) и алгоритм преобразования этих данных (инкапсуляцию); формирование ММ процесса (объекта); геометризацию модели или результатов ее вычислительной реализации (компьютерную визуализацию средствами компьютерной графики – выполнение геометрических построений (преобразований)).

Следует учитывать то обстоятельство, что преобладающая часть аномальных диффузионных процессов встречается в геологических (пластовых) системах при проявлении сущности физических явлений фильтрационного движения внутрипластовых жидкостей, рассматриваемых в форме дуальности «фильтрующаяся жидкость – пористая среда» [1]. Типичными примерами в данном случае могут выступать: движение грунтовых вод, пропитка оснований гидротехнических сооружений, разработка нефтегазовых месторождений в условиях их вскрытия системой добывающих и нагнетательных скважин [1, 4–12]. Очевидная сложность исследуемых объектов (ограниченность или невозможность прямых измерений, значительные размеры

пространственных областей и «негладкость» их границ, нестационарность и параметрическая нелинейность и т.д.) делают практически нереальным натурное исследование последних [1, 4, 5, 13].

Учитывая указанные обстоятельства, ИТ исследования нестационарных аномальных диффузионных процессов (НАДП) предполагает следующую последовательность реализуемых задач:

1. Идентификация и классификация НАДП.
2. Моделирование динамики НАДП.
3. Представление и обработка результатов моделирования НАДП.

Цели и этапы решения указанных задач также приведены на рис. 1.

Предложенная ИТ основана на проведении вычислительного эксперимента с использованием ограниченной измерительной информации об аномальном диффузионном процессе. Последнее, как отмечалось выше, обусловлено тем, что реальные измерения о состоянии НАДП можно получить лишь в ограниченном числе точек.

Решение задачи идентификации и классификации основывается на совокупности математических моделей аномальных диффузионных процессов, представленных в виде вариационных неравенств [14].

При этом классификационным признаком служат функционалы $j(u)$, $j(v)$, определяющие вид соответствующих вариационных неравенств. В целом задача состоит из двух этапов:

— *структурной идентификации* – определения вида функционалов $j(u)$, $j(v)$, входящих в ММ НАДП (суть – *классификация* данных ММ);

— *параметрической идентификации* – определение параметров при частных производных вариационных неравенств, входящих в ММ НАДП (суть – определение числовых значений параметров вариационных неравенств).

В ходе решения задачи *моделирования динамики* НАДП определяются поля функций состояния исследуемого процесса. Вследствие этого этапами решения служат *дискретизация* полученной непрерывной ММ НАДП и последующая *численная реализация* конечномерной ММ НАДП с формированием полей функции состояния.

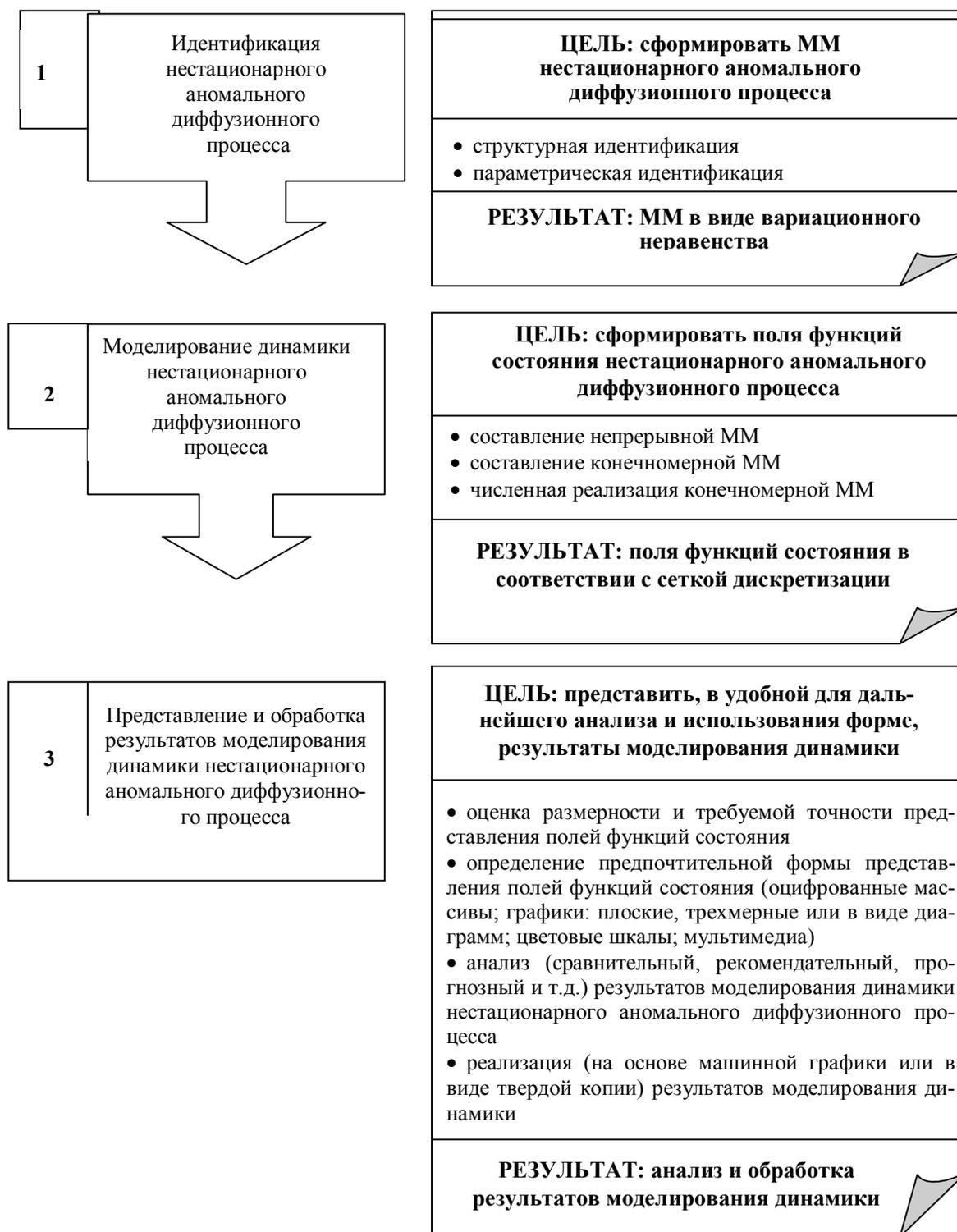


Рис. 1. Структурная схема информационной технологии моделирования нестационарных аномальных диффузионных процессов

Заключительной задачей, решаемой в рамках описываемой ИТ, является *представление и обработка результатов* моделирования динамики НАДП. В ходе ее решения осуществляется *оценка* размерности и точно-

сти представления результатов моделирования динамики НАДП, *определение формы представления* этих результатов моделирования (оцифрованные массивы, графики, цветовые шкалы и т.д.), *анализ* полученных ре-

зультатов моделирования динамики НАДП (при необходимости) и *визуализация* результатов моделирования (на основе машинной графики или в виде твердой копии).

На основе описанной структуры ИТ разработаны *инструментальные средства*, которые являются пользовательским приложением, созданным на платформе проблемно-ориентированного пакета Matlab. При этом был использован опыт разработки инструментальных средств, содержащийся, например, в работах [15–17]. Простой встроенный язык программирования среды Matlab позволяет легко создавать собственные алгоритмы. Однако простота языка программирования компенсируется большим количеством функций Matlab и соответствующих ToolBox. Данное сочетание при использовании формализованных процедур обеспечивает эффективное решение практических задач.

Выводы. Была предложена и реализована ИТ, ориентированная на решение задач математического моделирования аномальных диффузионных процессов. Отличительной чертой ИТ является гибкий выбор инструментария обработки массивов данных (реляционное представление, графические примитивы и т.д.), что, в зависимости от их дальнейшего использования, позволяет на (15–40 %) сократить время на их последующую обработку.

Список литературы

1. Верлань А. Ф. Математическое моделирование аномальных диффузионных процессов / Верлань А. Ф., Положаенко С. А., Сербов Н. Г. – К. : Наукова думка, 2011. – 416 с.
2. Мацевитый Ю. М. Моделирование нелинейных процессов в распределенных системах / Ю. М. Мацевитый, В. Е. Прокофьев. – К. : Наукова думка, 1985. – 302 с.
3. Самарский А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2005. – 265 с.
4. Мукумбеков М. Ж. Моделирование одного варианта разработки нефтегазовых месторождений / М. Ж. Мукумбеков // Математическое моделирование и информационные технологии в образовании и науке : материалы междунар. науч.-метод. конф., посвященной 70-летию АГУ имени Абая. – Алматы, 1998. – С. 29.
5. Мукумбеков М. Ж. Численное моделирование трехфазной фильтрации с предельным градиентом сдвига / М. Ж. Мукумбеков // Вестник КазГУ. – 1998. – № 12. – С. 175–182. – (Серия : математика, механика, информатика).
6. Smagulov Sh. Information system in production of oil producing branch / Sh. Smagulov, B. Zhumagulov, M. Mukimbekov // New technologies in Islamic countries : Proceedings of Internat. scient. and tech. conf. VI General Assembly of FEIC. – Almaty, 1999. – P. 123–126.
7. Usage of an information system in exploitation of oil fields / Sh. Smagulov, K. Eseekeev, Zh. Akkulov at al. // New technologies in Islamic countries : presentations of Internat. scient. and tech. conf. VI General Assembly of FEIC. – Almaty, 1999. – P. 193–200.
9. Laflen J. M. WEPP: a new generation in erosion prediction technology / J. M. Laflen, L. J. Jane, G. R. Foster // J. of Soil and Water Conservation. – 1991. – Vol. 46. – P. 34–38.
10. Oppenheimer M. Context connection and opportunity in environmental problem solving / M. Oppenheimer // Environment (USA). – 1995. – Vol. 37, No 5. – P. 10–15, 34–38.
11. Statistical models for limiting factors in ecology / J. Opsomer., P. Speckman., M. Kaiser, J. Jones. // J. Amer. Statist. Assoc. – 1994. – Vol. 89. – P. 410–423.
12. Sousa E. Super-diffusive transport. Processes in porous media : Springer Proceedings in Mathematics and Statistics. – 2013. – P. 87–98, doi: 10.1007/978-1-4614-5055-9_5.
13. Gorenflo R. Some recent advances in theory and simulation of fractional diffusion processes / R. Gorenflo, F. J. Mainardi // Real World Applications. – 2009. – Vol. 229 (2). – P. 400–415.
14. Положаенко С. А. Представление класса моделей аномальных диффузионных процессов на основе вариационных неравенств / С. А. Положаенко, О. М. Абдуллах // Математичне та комп'ютерне моделювання : зб. наук. праць ; Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ, Кам'янець-Подільський нац. ун-т ім. Івана Огієнка. – Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський нац. ун-т ім. Івана Огієнка, 2014. – Вип. 11. – С. 124–133. – (Серія : Технічні науки)

15. An extension of the linear Luikov system equations of heat and mass transfer / F. R. G. B. a. Silva, G. b. Gonçalves, M. K. Lenzi et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013 (63). – P. 233–238, doi: 0.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.007.
16. Pagnini G. a. b. The M-Wright function as a generalization of the Gaussian density for fractional diffusion processes / G. a. b. Pagnini // *Fractional Calculus and Applied Analysis*. – 2013. – 16 (2). – P. 436–453, doi: 10.2478/s13540-013-0027-6.
17. Solutions for a fractional diffusion equation with noninteger dimensions / L. S. a. Lucena, L. R. a. Da Silva, A. A. b. Tateishi et al. // *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. – 2012. – 13 (4). – P. 1955–1960, doi: 10.1016/j.nonrwa.2011.12.025.

References

1. Verlan, A. F., Polozhaenko, S. A. and Serbov, N. G (2011) Mathematical design of anomalous diffusive processes. Kiev: Naukova dumka, 416 p. [in Russian].
2. Mazevity, Yu. M. and Prokofiev, V. E. (1985) A design of nonlinear processes in distributed systems. Kiev: Naukova dumka, 302 p. [in Russian].
3. Samarsky, A. A. and Mychailov, A. P. (2005) Mathematical design: Ideas. Methods. Examples. Moscow: Fizmatlit, 265 p. [in Russian].
4. Mukimbekov, M. J. (1998) Design of one variant of the development of oil and gas deposits. *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tehnologii v obrazovanii i nauke: materials of internat. scient.-method. conf., dedicated to the 70th year of Abai AGU*. Almaty, p. 29 [in Russian].
5. Mukimbekov, M. J. (1998) Numeral design of three-phase filtration with the maximum gradient of change. *Vestnik KazGU, seriya: matematika, mehanika, informatika*, (12), pp. 175–182 [in Russian].
6. Smagulov, Sh., Zhumagulov, B. and Mukimbekov, M. (1999) Information system in production of oil producing branch. *New technologies in Islamic countries: Proceedings of Internat. scient.-tech. conf. VI General Assembly of FEIIC. Almaty*, pp. 123–126.
7. Smagulov Sh., Esekeev, K., Akkulov, Zh., Azamatov, Zh. et al. (1999) Usage of an information system in exploitation of oil fields. *New technologies in Islamic countries: Presentations of Internat. scient.-tech. conf. VI General Assembly of FEIIC. Almaty*, pp. 193–200.
9. Laflen, J. M., Jane, L. J. and Foster, G. R. (1991) WEPP: a new generation in erosion prediction technology. *J. of Soil and Water Conservation*, (46), pp. 34–38.
10. Oppenheimer, M. (1995) Context connection and opportunity in environmental problem solving. *Environment (USA)*, 37 (5), pp. 10–15, 34–38.
11. Opsomer, J., Speckman, P., Kaiser, M. and Jones, J. (1994) Statistical models for limiting factors in ecology. *J. Amer. Statist. Assoc.*, (89), pp. 410–423.
12. Sousa, E. (2013) Super-diffusive transport. Processes in porous media. *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*, pp. 87–98, doi: 10.1007/978-1-4614-5055-9_5.
13. Gorenflo, R. and Mainardi, F. J. (2009) Some recent advances in theory and simulation of fractional diffusion processes. *Real World Applications*, 229 (2), pp. 400–415.
14. Polozhaenko, S. A. and Abdullach, O. M. (2014) Presentation of class of models of anomalous diffusive processes on the basis of variation inequalities. *Matematychna ta compjuterne modeluvannya. Seriya: Tehnichni nauky: collection of scient. works. Kam'ianets'-Podil's'kyi: Kam'ianets'-Podil's'kyi nats. un-t im. Ivana Ogienko*, (11), pp. 124–133 [in Russian].
15. Silva, F. R. G. B. a., Gonçalves, G. b., Lenzi, M. K. c et al. (2013) An extension of the linear Luikov system equations of heat and mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (63), pp. 233–238, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.007.
16. Pagnini, G. a. b (2013) The M-Wright function as a generalization of the Gaussian density for fractional diffusion processes. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 16 (2), pp. 436–453, doi: 10.2478/s13540-013-0027-6.
17. Lucena, L. S. a., Da Silva, L. R. a., Tateishi, A. A. b. et al. (2012) Solutions for a fractional diffusion equation with noninteger dimensions. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 13 (4), pp. 1955–1960, doi: 10.1016/j.nonrwa.2011.12.025.

Omar Muajad Abdullach, *graduate student*
Odessa National Polytechnic University
Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine
omarukrain@yahoo.com

**THE STRUCTURE AND TOOLS OF INFORMATION TECHNOLOGY
FOR THE DECISION OF TASKS OF MATHEMATICAL DESIGN
OF NONSTATIONARY ANOMALOUS DIFFUSIVE PROCESSES**

Scientific and technical issue of the creation of effective technologies for realization of facilities of mathematical design of the class of anomalous diffusive processes is considered.

The analysis of subject domain shows that anomalous diffusive processes do not make exceptional phenomenon, but they are ordinary cases, for example, for the certain forms of the systems «liquid – porous environment». The features of the physics of the behaviour of anomalous diffusive processes (presence of maximum gradients, one-sided conductivity of spatial regions scopes, various sort of limitations) are complicated by model research which stipulates the actuality of mathematical design during their (processes) research. Thus in the sphere of actual tasks of the research of anomalous diffusive processes it is necessary also to deliver the organization of researches, in particular, the construction of information technology for realization of mathematical design tasks.

A structure and tools of information technology for realization of tasks of mathematical design of anomalous diffusive processes in the conditions of their nonstationarity is offered.

Keywords: *information technology, tools, mathematical design, anomalous diffusive process, nonstationary task.*

*Рецензенти: С. А. Положаєнко, д.т.н., професор,
В. В. Палагін, д.т.н., професор*