

Разработка пространственно-распределённой математической модели буровой установки

А. Н. Ильюшина

Санкт-Петербургский колледж управления и коммерции
bdbyu@mail.ru

И. М. Новожилов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
novozhilovim@list.ru

Аннотация. В статье рассматриваются процедура синтеза математической модели буровой установки после включения в нее импульсных секционных нагревателей. Построена математическая модель на основе функции Грина и классического уравнения теплопроводности.

Ключевые слова: управление; системный анализ; электромеханика; регулятор

В связи с ростом в общем объеме получаемого нефтесодержащего сырья в России, происходит возрастание количества осложненных нефтяных территорий, характеризующихся высоким содержанием парафиновых углеводородов и смолисто-асфальтеновых компонентов.

Различные виды осложнений, такие как, образование асфальтосмолопарафиновых отложений – АСПО, коррозия, образование водонефтяных эмульсий ВНЭ, отложение минеральных солей, при эксплуатации нефтедобывающих скважин являются причиной преждевременных отказов и уменьшения сроков службы скважинного оборудования, уменьшения текущих отборов нефти, увеличения финансовых затрат на предупреждение и удаление отложений, ликвидацию аварий, на проведение подземного ремонта скважин.

Наибольшее распространение получило новое направление, применение в скважинах нагревательных кабельных линий и других типов нагревательных систем для поддержания температуры поднимаемой жидкости выше температуры насыщения нефти парафином.

Для выбора оптимального нагревателя с применением автоматического управления, необходимо учитывать надежность работы, экономическую эффективность и безопасную эксплуатацию.

Целью настоящей работы является рассмотреть вопрос по разработке технологии применения импульсного нагревателя для борьбы с образующимися на стенках насосно-компрессорных труб АСПО.

Для решения данной задачи рассмотрим пространственно трехмерный объект управления. Математическая модель такого объекта имеет вид:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} - a^2 \left[\frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] = f(x, y, z, t)$$

$$Q(x, y, z, 0) = Q_0(x, y, z); Q(0, y, z, t) = q_1(y, z, t);$$

$$Q(L_1, y, z, t) = q_2(y, z, t); Q(x, 0, z, t) = q_3(y, z, t);$$

$$Q(x, L_2, z, t) = q_4(x, z, t); Q(x, y, 0, t) = q_5(x, y, t);$$

$$Q(x, y, L_3, t) = q_6(x, y, t);$$

$$0 \leq x \leq L_1; 0 \leq y \leq L_2; 0 \leq z \leq L_3; t \geq 0; a > 0;$$

Расчет значений теплового поля целесообразнее вести на основе общепринятых математических моделей. На основании этого утверждения произведем модификацию функции Грина [1–3]. Позволенная модификация позволит производить расчет значений исходя из величины (мощности) входного значения. Таким образом, модифицированная функция будет выглядеть следующим образом:

$$G(x, y, z, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3} \cdot \sum_{k, m, n=1}^{\infty} B_{k, m, n}(\cdot) \cdot \exp \left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{L_1^2} + \frac{m^2}{L_2^2} + \frac{n^2}{L_3^2} \right) \right]$$

$$B_{k, m, n}(\cdot) = \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot y}{L_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{n \cdot \pi \cdot z}{L_3} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho}{L_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot v}{L_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{n \cdot \pi \cdot \vartheta}{L_3} \right).$$

В данной функции условно обозначены: d – количество источников нагрева, имеющий порядковый номер p источника нагрева Z который будет включен в действительный момент времени t ; $z(p)$ – один из источников нагрева; l_1, l_2, l_3 – пространственные координаты; ρ, v, ϑ – координаты точечного источника ξ ; a^2 – температуропроводность материала; k, m, n – количество членов ряда Фурье при разложении входного воздействия по ширине и длине; x, y, z – координаты исследуемой точки; t – момент времени [2].

Построенная функция при нулевых граничных условиях будет описываться передаточной функцией вида:

$$W(x, y, z, \rho, v, \vartheta, s) = \frac{8}{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3} \cdot \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \frac{B_{k,m,n}(\cdot)}{s + a^2 \pi^2 \left(\frac{k^2}{L_1^2} + \frac{m^2}{L_2^2} + \frac{n^2}{L_3^2} \right)}.$$

Представленная функция позволяет рассчитывать передаточные коэффициенты функции начального нагрева. Также на основе ее можно анализировать устойчивость замкнутой, и в ряде случаев, разомкнутой системы управления. Тогда проведя анализ полученных уравнений понято, что значение температурного поля есть температура в данный момент времени и в предыдущий момент. Таким образом, необходимо производить учет функции начального нагрева. Итоговая расчетная функция, состоящая из функции начального нагрева и функций отображающее значение температурного поля в текущий момент времени будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} G(x_j, y_j, z_j, \rho, v, \vartheta, t) = & \sum_{i=1}^d \frac{8}{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3} \cdot \\ & \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_j}{L_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot y_j}{L_2}\right) \cdot \\ & \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho_i}{L_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot v_i}{L_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z_j}{L_3}\right) \cdot \\ & \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \vartheta_i}{L_3}\right) \cdot \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{L_1^2} + \frac{m^2}{L_2^2} + \frac{n^2}{L_3^2}\right)\right] \cdot \\ & \cdot \sum_p \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_j}{L_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot y_j}{L_2}\right) \cdot \\ & \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z_j}{L_3}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho_{z(p)}}{L_1}\right) \cdot \\ & \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot v_{z(p)}}{L_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \vartheta_{z(p)}}{L_3}\right) \cdot \\ & \cdot \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot (t - \tau) \cdot \left(\frac{k^2}{L_1^2} + \frac{m^2}{L_2^2} + \frac{n^2}{L_3^2}\right)\right]. \end{aligned}$$

Даная функция показывает поведение системы в начальный момент времени, когда система получает первый импульс. В связи с тем, что система находится в состоянии покоя, данный импульс имеет максимальную амплитуду. Распространение тепла по объекту проходит в разных направлениях с одинаковой скоростью это связано с однородностью материала. В случае неоднородности материала температурный процесс будет происходить не равномерно, что приведет к различной скорости нагревания материала. [3, 8, 9, 15, 20–36].

Найдем функцию, определяющую время включения первого управляющего воздействия – τ_1 . Функция, определяющая значение температурного поля трехмерного объекта управления, в некоторый момент времени t будет

определяться одной составляющей ряда Фурье. Выражая значение члена ряда Фурье, получим следующее уравнение [3, 4, 5, 6]. Тогда если принять во внимание условие, $T(x, y, z, t) = T_{zad}$ которое необходимо для обеспечения устойчивости системы, получим:

$$\begin{aligned} \exp\left[-a^2 \pi^2 t \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)\right] = \\ = \frac{l_1 l_2 l_3 T_{zad}}{8 \sin \frac{\pi}{l_1} x_{kr} \sin \frac{\pi}{l_2} y_{kr} \sin \frac{\pi}{l_3} z_{kr} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}. \end{aligned}$$

Основываясь на этом предположим что данной системе ортогональны следующие равенства $x_{kr} = \rho_1$, $y_{kr} = v_1$, $z_{kr} = \vartheta_1$ и обозначив время $t = \tau_1$, получим:

$$\begin{aligned} a^2 \pi^2 \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3}\right) \tau_1 = \\ = \ln \left(\frac{8 \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_1 \sin \frac{\pi}{l_2} v_1 \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_1 \sum_{i=1}^N \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}{l_1 l_2 l_3 T_{zad}} \right); \end{aligned}$$

Откуда следует что:

$$\begin{aligned} \tau_1 = \frac{1}{a^2 \pi^2 \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3}\right)} \cdot \\ \cdot \ln \left(\frac{8 \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_1 \sin \frac{\pi}{l_2} v_1 \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_1 \sum_{i=1}^N \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}{l_1 l_2 l_3 T_{zad}} \right) \end{aligned}$$

Таким образом, получена методика расчета времени и места включения температурных источников [1–7, 9–38]. Откуда появляется логичное предположение о не постоянной работоспособности всех источников. Проведем исследования по определению времени и места включения нагревательных элементов для различных видов материала и различным количеством нагревательных элементов. Для этой цели установим начальные значения системы: $l_1=l_2=l_3=10$, $k=10$, $d=10$, $T_{zad} = 1...500$, $a^2=0,01$, $x_1=y_1=z_1=v_1=p_1=Q_1=1$, $y, x, v, p_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, $\tau=3$. При введении таких значений в среду Mathcad 14 мы получим значения, представленные в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

№ источника	d=5	d=6	d=8	d=9	d=10
1	0,08	0,004	6,32	7,44	6,05
2	0,06	0,003	4,70	5,53	4,50
3	0,045	0,002	3,49	4,11	3,34
4	0,034	0,001	2,60	3,06	2,49
5	0,025	0,001	1,93	2,27	1,85
6	0,018	0,0009	1,43	1,69	1,37
7	0,014	0,0007	1,06	1,26	1,02
8	0,010	0,0005	7,95	9,37	7,61
8	0,007	0,0004	5,91	6,97	5,66
9	0,005	0,0002	4,40	5,18	6,05

На основании данных полученных в таблице можно сделать вывод о неравномерности прогревания объекта. И как следствие отсутствие необходимости изготовления сплошных нагревательных элементов.

Закключение. В настоящее время в России в общем балансе нефти значительное место занимают высоковязкие и парафинистые нефти, доля которых неуклонно растёт.

Добычу этих нефтей характеризует ряд существенных особенностей. В реальных условиях при неизотермическом режиме извлечения нефти на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб наблюдается образование асфальтосмолопарафиновых отложений, уменьшающее сечение лифтовой колонны и приводящих к снижению ее пропускной способности. В следствии этого уменьшается текущий дебит скважины, снижается коэффициент продуктивности и, в конечном счете, коэффициент нефтеотдачи.

В условиях интенсивного отложения невозможна нормальная эксплуатация скважин без проведения систематической работы по депарфинизации, в результате чего увеличиваются эксплуатационные затраты на обслуживание скважин.

Как ни парадоксально, но в настоящее время не существует универсального метода или технологии удаления образования АСПО.

Предупреждать возможные аварии и инциденты можно с помощью автоматического контроля, регулирования технологии и автоматической защиты оборудования от разрушения.

В результате работы были получены следующие выводы и результаты:

- 1) Возможность стабилизации температурного поля в пределах допустимых значений за счет использования импульсных нагревательных элементов.
- 2) Были получены формулы для расчета места и времени включения температурных источников.
- 3) Разработанный программный комплекс, может, применяться для любых нагревательных элементов вне зависимости от технологического процесса.

В данной работе произведен поиск времени включения нагревательных элементов секционного нагревателя. Данная работа показала, что при замене сплошных нагревательных элементов на импульсные, сохраняется возможность выхода на заданный температурный режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ilyushin Y., Mokeev A. Distribution of temperature in a spatially onedimensional object as a result of the active point source // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 14(6).2019, c. 1238-1243
- [2] Kukharova T.V., Pershin I.M. Conditions of Application of Distributed Systems Synthesis Methods to Multidimensional Object/ 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 2019. № 8602749 DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602749
- [3] Kukharova T.V., Utkin V.A., Boev I.V. Observation and Prediction Systems Modeling for Human Mental State/ 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 2019 № 8602831 DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602831
- [4] Afanaseva O.V. Combustion engines vibro-activity diagnostic system, using the methods of similarity theory and analysis of dimensions / O.V. Afanaseva, D.A. Pervukhin, A.F. Nyrkov, S.Y. Chernyi, O.K. Bezyukov, Y.N. Serditov // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017, № 8109497, pp. 93-95. DOI: 10.1109/CTS.2017.8109497
- [5] Afanaseva O. Analysis and synthesis of distributed icedrill heating control system of mountain reconnaissance drilling rig / O. Afanaseva, Y. Ilyushin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management: 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018, Bulgaria: Albena 2–8 July 2018. Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., 2018, Volume 18, Issue 2.2, pp. 41-48. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2/S08.006
- [6] Afanaseva O. Analysis and processing of the hydrolitospheric plast information remote sensing through the theory of systems with distributed / O. Afanaseva, Y. Ilyushin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management: 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018, Bulgaria: Albena 2–8 July 2018. Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., 2018, Volume 18, Issue 2.2, pp. 35-40. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2/S08.005
- [7] Ilyushin Y.V., Pervukhin D.A., Afanasyeva O.V., Kolesnichenko S.V., Afanasyev M.P. Improving energy efficiency of tunnel furnaces of the pipeline type-the solution of the problem(2017) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (6), pp. 1801-1812.
- [8] Ilyushin Y.V., Kivayev I.N., Novozhilov I.M. Classification of modern educational programs by functional purpose (2018) Proceedings of 2017 IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017, 2018-January, pp. 96-99. DOI: 10.1109/IVForum.2017.8246061
- [9] Ilyushin Y.V., Novozhilov I.M. Software implementation of a pulse regulator of a distributed distributed control object (2017) Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017, сr. № 8109555, pp. 315-317. DOI: 10.1109/CTS.2017.8109555
- [10] Ilyushin Y.V., Novozhilov I.M. Development of a technique for the synthesis of a pulsed regulator of a distributed control system (2017) Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017, сr. № 8109517, pp. 168-171. DOI: 10.1109/CTS.2017.8109517
- [11] Ilyushin Y., Mokeev A. The control system of the thermal field in tunnel furnace of a Conveyor type (2017) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (22), pp. 6595-6605.
- [12] Ilyushin Y.V., Novozhilov I.M. Analyzing of heating elements' location of distributed control objects (2017) Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017, сr. № 7970519, pp. 138-141. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970519

- [13] Ilyushin Y.V., Novozhilov I.M. Analyzing of distributed control system with pulse control (2017) Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017, cr. № 7970565, pp. 296-298. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970565
- [14] Ilyushin Y., Mokeev A. Tunnel furnace of a conveyor type: Technical controlling of the temperature field (2017) International Journal of Applied Engineering Research, 12 (20), pp. 9377-9389.
- [15] Ilyushin Y., Mokeev A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type (2017) International Journal of Applied Engineering Research, 12 (8), pp. 1500-1510.
- [16] Pershin I.M. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems / I.M. Pershin, D.A. Pervukhin, Y.V. Ilyushin, O.V. Afanaseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 87 (3), № 032029. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032029
- [17] Pershin I.M. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells / I.M. Pershin, D.A. Pervukhin, Y.V. Ilyushin, O.V. Afanaseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 87 (3), № 032029. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032030
- [18] Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Vinogradov E.A. Assessment of the influence of the first established and identification of critical steps in main roof caving (2018) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13 (10), pp. 3350-3354.
- [19] Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Sirenko Y.G. Numerical study of the air-gas dynamic processes when working out the Mosshny seam with longwall faces (2018) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13 (4), pp. 1534-1538.
- [20] Sidorenko A.A., Sirenko Yu.G., Sidorenko S.A. Influence of face advance rate on geomechanical and gas-dynamic processes in longwalls in gassy mines (2018) Eurasian Mining, (1), pp. 3-8. DOI: 10.17580/em.2018.01.01
- [21] Meshkov S., Sidorenko A. Numerical Simulation of Aerogas dynamics Processes in A Longwall Panel for Estimation of Spontaneous Combustion Hazards (2017) E3S Web of Conferences, 21, статья № 01028. DOI: 10.1051/e3sconf/20172101028
- [22] Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Vinogradov, E.A. Substantiation of the technological schemes of intensive development of gas-bearing coal beds (2017) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (7), pp. 2259-2264.
- [23] Shipachev A. Optimum Conditions of Turning and Surface Plastic Deformation Determination Taking into Account Technological Heredity (2018) Journal of Physics: Conference Series 1118(1), 012036 DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012036
- [24] Samigullin G., Shipachev A., Samigullina L. CONTROL of PHYSICAL and MECHANICAL CHARACTERISTICS of STEEL by SMALL PUNCH TEST METHOD. (2018) Journal of Physics: Conference Series 1118(1), 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012038
- [25] Verzhbitskiy K., Samigullin G., Shipachev A. Increasing service life of chuck unit of tank during cyclic loading. (2018) Journal of Physics: Conference Series 1118(1), 012040 DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012040
- [26] Shipachev A.M., Nazarova M.N. Phenomenon of low-alloy steel parametrization transformation at cyclic loading in low-cyclic area (2018) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 87(9), 092017 DOI: 10.1088/1755-1315/87/9/092017
- [27] Kirsanova N.Y., Lenkovets O.M., Nikulina A.Y. (2018). The Role and Future Outlook for Renewable Energy in the Arctic Zone of Russian Federation, European Research Studies Journal Volume XXI Special Issue 2, 356-368
- [28] Kirsanova N.Y., Lenkovets O.M. Solving monocities problem as a basis to improve the quality of life in Russia // Life Science Journal 2014;11(6s): p.522-525
- [29] Kirsanova N.Y., Lenkovets O.M. Future Vision and Possibilities of Russia's Transition to "Green" Economy // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS / RRI 2016 - International Conference «Responsible Research and Innovation», 2017, Vol. XXVI, 514-521 pp, e- DOI: dx.doi.org/10.15405/epsbs.2017.07.02.66
- [30] Golovina E.I. Problems of groundwater extraction from transboundary aquifers and complexes / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, № 151, V 4, 2018. C 1 - 8. DOI: 10.1088/1755-1315/151/1/012007
- [31] Pashkevich N.V., Golovina E.I., Tarabarinova T.A., Problems of reflecting information on subsoil assets in International Financial Reporting Standards / Academy of Strategic Management Journal, № 17, V 3, 2018. pp. 1-9.
- [32] Chvileva T.A., Golovina E.I. Publication of reporting of metallurgical companies in context of the concept of corporate sustainable development / Journal of Industrial Pollution Control, № 33, T 1, 2017. C 926-930.