

УДК 004.89

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-2-642-649

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА НА БАЗЕ ИНС-МОДЕЛЕЙ

© А.А. Арзамасцев, Н.А. Зенкова

В статье описаны основные этапы разработки экспертной системы на базе интеллектуального ядра, представляющего собой математическую модель объекта, разработанного с использованием искусственных нейронных сетей и эмпирических данных.

Ключевые слова: экспертная система; ИНС-модель; искусственные нейронные сети.

Целью данной статьи является апробация технологии разработки экспертных систем на основе ИНС-моделей, предложенная нами ранее [1–3] для промышленного объекта.

Объект представляет собой биотехнологический процесс, в котором осуществляется утилизация отходов производства этанола на мелассной сырьевой основе с выработкой бактериальной биомассы. Детальное описание данного процесса с описанием основных технологических параметров, а также как объекта управления дано в наших работах [4–6].

На рис. 1 показана схема данного биотехнологического процесса. Данная технология была реализована на ОАО «Биохим», г. Рассказово, Тамбовская область. Выбор данного объекта для апробации экспертной системы связан с тем, что в нашем распоряжении име-

ется значительный объем производственных данных по этому процессу за предыдущие годы.

На рис. 2 показана упрощенная схема участка производства бактериальной биомассы, являющегося объектом рассмотрения. Основными технологическими единицами являются: биореактор, в котором осуществляется выработка биомассы, термофлотатор, служащий для ее концентрирования, и сушилка-гранулятор, в которой биомасса высушивается и приобретает товарный вид.

Основной технологической единицей, влияющей на утилизацию отходов и выработку биомассы, является четырехсекционный биореактор-ферментер, детальное описание которого также приведено в наших работах [4–6].

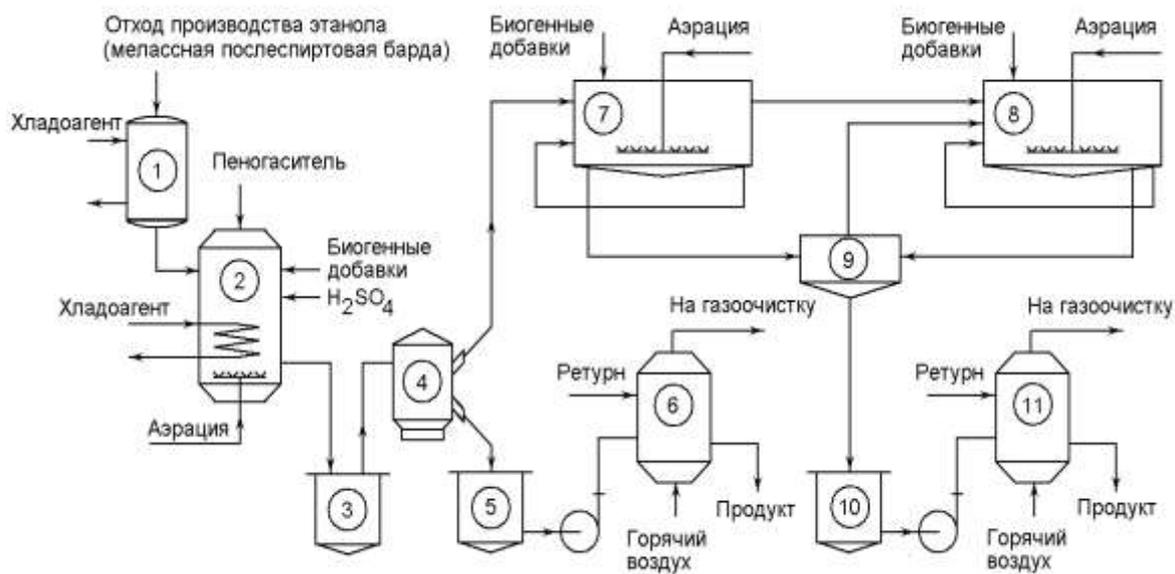


Рис. 1. Схема биотехнологического процесса утилизации отходов производства этанола с выработкой бактериальной биомассы. 1 – теплообменник; 2 – биохимический реактор первой ступени; 3 – резервуар; 4 – сепаратор; 5 – резервуар; 6 – сушилка-гранулятор; 7, 8 – биохимические реакторы второй ступени; 9 – термофлотатор; 10 – резервуар для белкового концентрата; 11 – сушилка-гранулятор

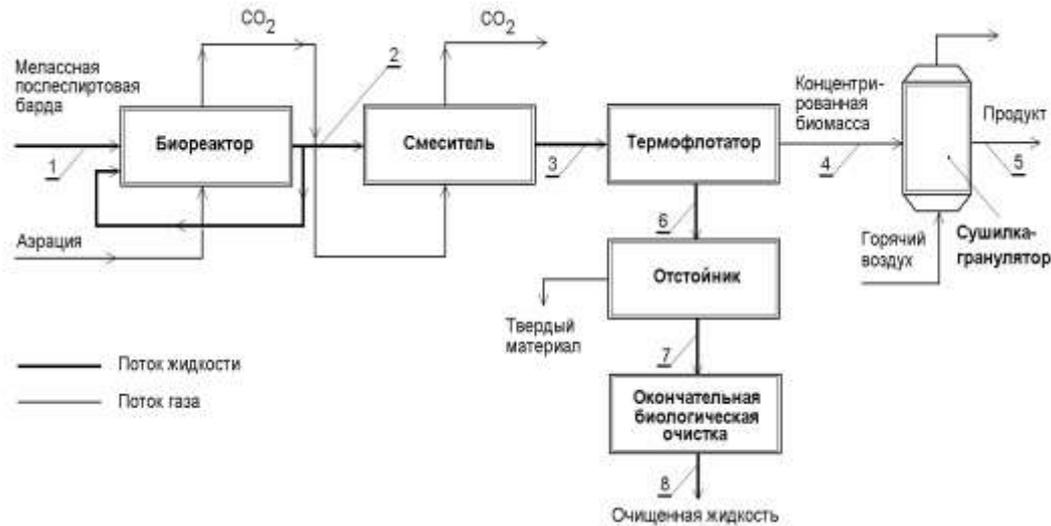


Рис. 2. Упрощенная схема биотехнологического процесса с указанием основных потоков. 1 – отход производства этанола – субстрат (ХПК ≈ 55000–60000 мгО₂/л, БПК₅ ≈ 25000–32000 мгО₂/л; сухих веществ 8–12 %, объемный расход 10 м³/ч); 2 – биомасса и остаточный субстрат (концентрация биомассы 10–20 кг/м³, концентрация остаточного субстрата ХПК ≈ 1000–3000 мгО₂/л, БПК₅ ≈ 200–500 мгО₂/л; объемный расход 10 м³/ч); 3 – биомасса, обогащенная двуокисью углерода; 4 – концентрированная биомасса (концентрация до 25–40 кг/м³); 5 – готовый продукт (выработка 1–1,6 т/сут, зольность – не более 26 %, содержание белка – не менее 47 %); 6 – осветленный сток на биологическую очистку; 7 – осветленный сток после окончательного отделения биомассы; 8 – очищенная жидкость (ХПК не более 3000 мгО₂/л, БПК₅ не более 200–500 мгО₂/л)

Технология разработки экспертной системы для данного объекта. Далее опишем технологию разработки экспертной системы для этого объекта, включающую обучение интеллектуального ядра на основе искусственных нейронных сетей (построение ИНС-модели) и сравнение результатов определения технологических параметров, полученных с использованием экспертной системы и для реального объекта.

На рис. 3 показан фрагмент файла данных, полученных с технологического процесса (рис. 1 и рис. 2). Здесь приведены численные значения входных параметров: расхода отхода производства этанола – F , м³/ч, его концентрации – S_0 , кг/м^{3 (по БПК), температур в секциях реактора – T_1 – T_4 , °С, кислотности среды в секциях реактора – pH_1 – pH_4 и выходных параметров: концентраций биомассы в секциях – x_1 – x_4 , кг/м³ и концентраций субстрата в секциях реактора – s_1 – s_4 , кг/м³ (по БПК).}

Таким образом, полный файл данных представляет собой прямоугольную матрицу, содержащую 1000 строк, каждая из которых характеризует состояние биореактора и 18 столбцов, элементы каждого из которых характеризуют один из параметров состояния данного процесса. Необходимо отметить, что все параметры соответствуют схемам объекта (рис. 1, 2).

F	s0	T1	T2	T3	T4	pH1	pH2	pH3	pH4	x1	x2	x3	x4	s1	s2	s3	s4
9,34	29,78	20,63	28,12	27,06	30,40	7,86	7,78	8,76	8,49	10,18	10,79	15,53	18,89	18,47	8,44	1,08	0,20
9,43	29,35	20,14	24,22	28,36	30,64	7,62	7,64	8,28	8,12	9,86	10,00	15,13	15,73	17,80	9,41	1,82	0,33
5,77	23,20	13,73	24,78	28,30	28,61	7,08	8,08	8,95	8,03	6,86	12,02	14,92	15,35	22,10	3,19	1,33	0,36
10,38	30,03	13,38	24,87	27,37	30,33	7,95	8,31	8,69	8,22	8,60	10,52	15,52	15,95	18,91	6,35	1,35	0,20
10,64	29,68	20,02	24,71	28,68	29,71	7,54	7,89	8,08	8,62	7,92	11,48	14,68	15,55	18,88	10,79	2,71	0,64
9,11	30,54	20,87	24,37	28,94	30,30	7,23	8,44	8,05	8,04	8,29	10,96	15,90	16,23	20,30	6,11	1,00	0,18
9,86	31,22	19,42	24,60	28,09	30,23	7,23	8,68	8,14	8,02	7,06	10,10	18,08	16,22	20,29	8,13	1,97	0,36
5,08	28,96	20,39	25,85	27,71	30,00	7,31	8,18	8,43	8,85	8,30	10,61	15,42	15,80	18,94	5,07	1,13	0,19
9,27	30,26	19,53	25,90	27,76	30,58	7,14	7,64	8,26	8,09	7,94	11,07	15,21	16,06	22,26	10,34	2,59	0,46
10,62	29,79	19,23	25,90	27,91	30,89	7,07	7,65	8,49	8,00	7,80	11,72	14,67	15,43	19,30	9,74	2,39	0,48
10,99	29,70	19,08	24,02	27,01	30,44	7,05	7,73	8,64	8,21	7,28	10,67	10,82	14,06	19,36	11,15	3,01	0,47
10,71	29,96	19,58	24,63	27,09	29,23	7,04	8,43	8,23	8,99	7,92	12,79	14,70	15,31	19,78	6,84	1,64	0,24
5,41	23,46	20,37	24,32	28,65	30,40	7,51	7,64	8,05	8,42	10,57	10,69	15,80	15,84	19,36	5,56	1,03	0,19
10,37	30,64	19,89	25,88	29,69	30,20	7,87	7,99	8,74	8,03	7,82	12,63	15,24	15,86	21,14	8,43	1,89	0,36
10,65	30,96	19,94	25,08	28,09	30,60	7,12	8,13	8,65	8,11	8,83	12,99	16,39	16,05	22,44	8,55	2,04	0,39
10,02	31,41	20,62	24,94	27,44	29,56	7,81	7,57	8,44	8,08	8,40	10,03	15,63	16,24	17,25	8,37	1,87	0,24

Рис. 3. Фрагмент файла данных наблюдений за биотехнологическим процессом



Рис. 3. Схема представления объекта для разработки ИНС-модели

параметров (управляющих воздействий), который представляет собой набор входных переменных, с помощью которых пользователь объекта может оказывать влияние на процесс; **Y** – вектор выходных координат, численно выражающий интересующие свойства объекта (рис. 4); **w** – вектор весовых коэффициентов ИНС-модели, размерность которого определяет также ее число степеней свободы для настройки (обучения) по эмпирическим данным (рис. 3); F_S – оператор связи, зависящий от структуры ИНС-модели – **S**.

В нашем случае **x** представляет собой одномерный вектор с двумя координатами F и S_0 , **u** – одномерный вектор с восемью координатами T_1-T_4 и pH_1-pH_4 , **Y** – одномерный вектор с восемью координатами x_1-x_4 и s_1-s_4 .

Полученная модель должна быть нелинейной, т. к., например, в нее в качестве входных величин входят pH (показатель кислотности) среды, являющийся логарифмической функцией концентрации ионов водорода, и температура, зависимость от которой основных показателей биотехнологического процесса выражается экспоненциальным уравнением Аррениуса [4].

По данным технологического процесса (рис. 3) разрабатывали экспертную систему с использованием нашего программного обеспечения [7–9], вначале с использованием одного процессора, а затем с использованием вычислительного кластера. Ниже приведены результаты данной работы.

Так, на рис. 5 и 6 показан процесс обучения ИНС-модели с определенной конфигурацией. В данном случае речь идет об обучении ИНС с десятью входными нейронами, тремя нейронами в скрытом слое (линейная, квадратичная и кубическая функции) с использованием одного единственного процессора градиентным методом. Из рис. 5 и 6 видно, что погрешность модели быстро уменьшается, т. е. сеть с такой конфигурацией быстро обучается эмпирическим данным.

Необходимо отметить, что разрабатываемое нами программное обеспечение включает также авторский конструктивный алгоритм выбора структуры сети, описанный нами в [1–3].

В логарифмической системе координат (рис. 6) эмпирические данные по обучению ИНС-модели достаточно хорошо ложатся на прямую линию (с коэффициентом корреляции 0,983), что указывает на возможность использования для описания данного процесса зависимостей вида [1–3]:

$$\frac{dE(t)}{dt} = k_4 [E^* - E(t)], \tag{3}$$

с начальным условием: $E(0) = E_0$

Разделяя переменные в уравнении (3) и интегрируя, получим:

$$\int \frac{dE(t)}{k_4 (E^* - E(t))} = \int dt \text{ или } -\frac{1}{k_4} \ln [k_4 (E^* - E(t))] = t + c. \tag{4}$$

Определив постоянную интегрирования из начальных условий, получим решение в виде:

$$E(t) = E^* (1 - e^{-k_4 t}) + E_0 e^{-k_4 t}. \tag{5}$$

Здесь E – среднее квадратическое отклонение ИНС-модели от эмпирических данных; k_4 – коэффициент. Данные уравнения на практике позволяют решить следующие задачи: оценить первичный период накопления информации, необходимой для построения ИНС-

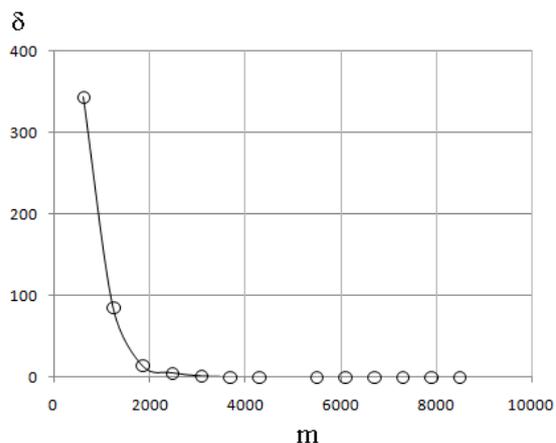


Рис. 5. Процесс обучения ИНС-модели (линейная, квадратичная и кубическая функции нейронов) градиентным методом. δ – среднеквадратическая погрешность, m – число тактов обучения. Один процессор

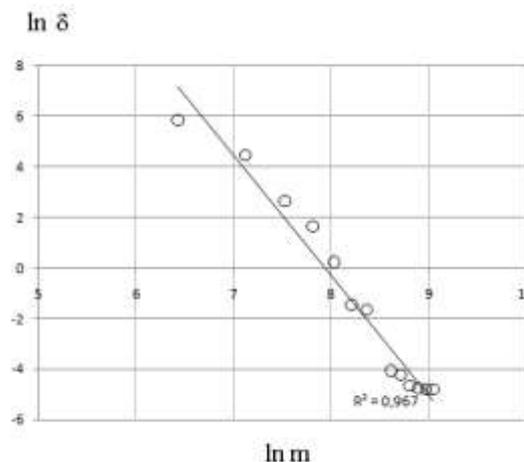


Рис. 6. Процесс обучения ИНС-модели (линейная, квадратичная и кубическая функции нейронов) градиентным методом. Один процессор. В логарифмических координатах

модели исследуемого объекта; определить начальную структуру ИНС-модели на основе входных характеристик объекта исследования; сделать оценку количества циклов обучения ИНС-модели в присутствии эксперта.

На рис. 7–10 показаны корреляции эмпирических данных (рис. 3) и значений x_1 , рассчитанных по ИНС-модели для различных структур ИНС. Из этих рисунков следует, что наилучшая структура ИНС-модели, соответствующая эмпирическим данным и определенная по среднеквадратической погрешности: десять входных нейронов, три нейрона с линейной, квадратичной и кубической передаточными функциями в скрытом слое и один выходной нейрон.

В табл. 1 приведены основные параметры моделей, корреляции для которых приведены на рис. 7–10.

На рис. 11 приведена также и схема ИНС-модели. Обучение ИНС-моделей, используемых в качестве интеллектуального ядра экспертных систем, проводили и на вычислительных кластерах. При этом проводили

расчеты концентраций субстрата в первой и четвертой секциях и концентрации биомассы в четвертой секции реактора: S_1 , S_4 и X_4 .

Был использован вычислительный кластер Тамбовского государственного технического университета, имеющий 4 процессора. Распараллеливание осуществляли на уровне вычисления значения целевой функции. Эффективность составила 90–92 %, время расчетов параллельной версии – около 4 часов с автоматизированным поиском оптимального варианта структуры ИНС-модели, показанной на рис. 12. В качестве оптимальной структуры ИНС-модели кластерной версией программы автоматизировано выбрана структура с одним кубическим, двумя квадратичными и четырьмя линейными нейронами. При этом относительные погрешности составили: для x_4 – 9 %, для s_1 – 19 %, для s_4 – 2 %. Корреляции эмпирических данных и расчетов по ИНС-модели для этих случаев показаны на рис. 13, 14 и 15.

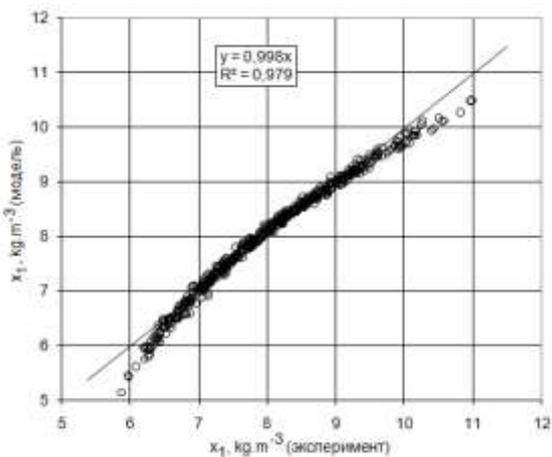


Рис. 7. Корреляция реальных данных – x_1 и расчетов x_1 по ИНС-модели для нейронной сети с одним линейным нейроном. Изображена корреляционная зависимость для 500 первых данных

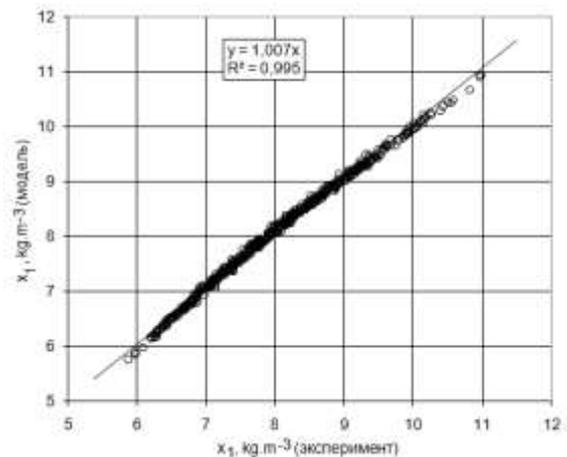


Рис. 9. Корреляция реальных данных – x_1 и расчетов x_1 по ИНС-модели для нейронной сети с одним линейным, одним квадратичным и одним кубическим нейронами. Изображена корреляционная зависимость для 500 первых данных.

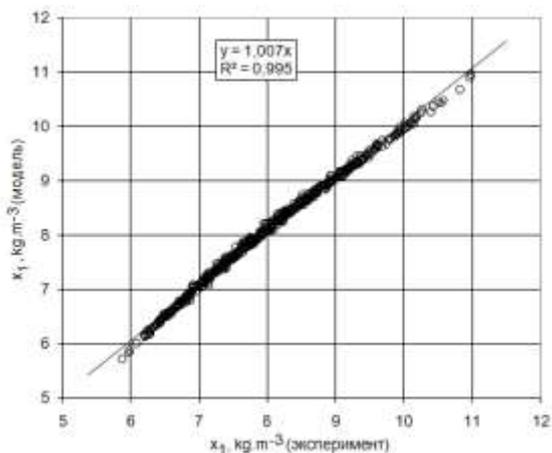


Рис. 8. Корреляция реальных данных – x_1 и расчетов x_1 по ИНС-модели для нейронной сети с одним линейным и одним квадратичным нейронами. Изображена корреляционная зависимость для 500 первых данных

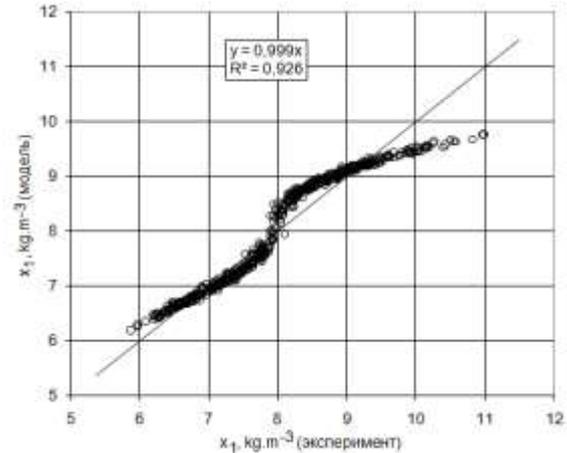


Рис. 10. Корреляция реальных данных – x_1 и расчетов x_1 по ИНС-модели для нейронной сети с одним сигмоидальным нейроном. Изображена корреляционная зависимость для 500 первых данных

Основные показатели описания эмпирических данных биотехнологического процесса с использованием различных ИНС-моделей, используемых в качестве интеллектуального ядра экспертных систем

Характеристика скрытого слоя	Коэффициент корреляции расчетных и эмпирических данных	Средняя квадратическая ошибка ИНС-модели	Время обучения ИНС-модели, мин.
Один линейный нейрон	0,989	0,02178	1,5
Линейный и квадратичный нейроны	0,997	0,00837	3
Линейный, квадратичный и кубический нейроны	0,997	0,00826	4,3
Сигмоидальный нейрон	0,962	0,07659	3

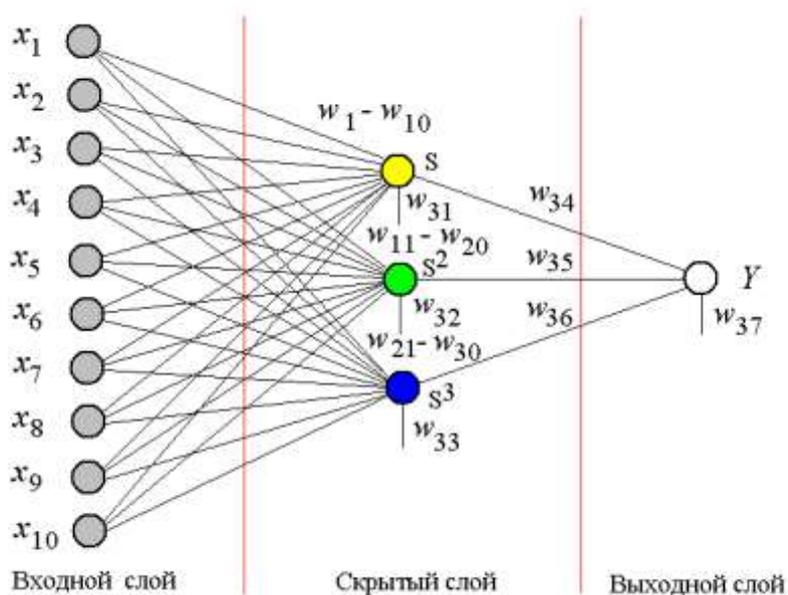


Рис. 11. Структура ИНС-модели, обеспечивающей адекватное представление эмпирической информации для производственного процесса, представленного на рис. 1 и 2

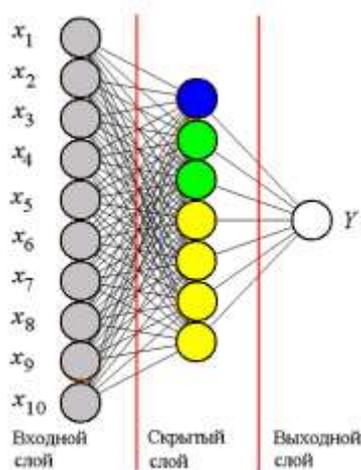


Рис. 12. Структура ИНС-модели, полученная с помощью вычислительного кластера и обеспечивающая адекватное представление эмпирической информации для производственного процесса, представленного на рис. 1 и 2

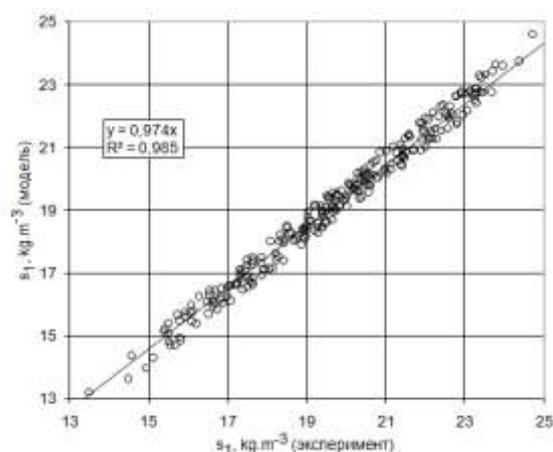


Рис. 13. Корреляция реальных данных – s_1 и расчетов s_1 по ИНС-модели для нейронной сети, показанной на рис. 12. Изображена корреляционная зависимость для 250 первых данных

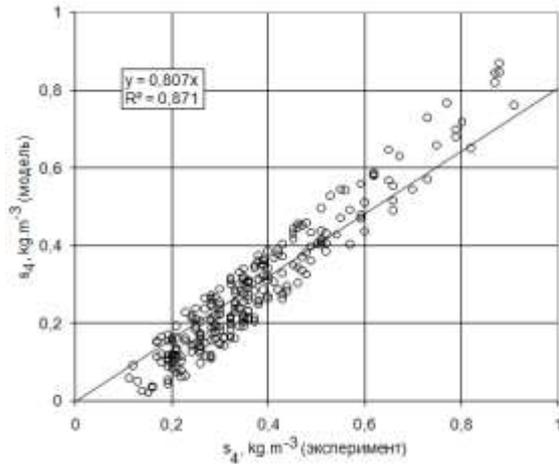


Рис. 14. Корреляция реальных данных – s_4 и расчетов s_4 по ИНС-модели для нейронной сети, показанной на рис. 12. Изображена корреляционная зависимость для 250 первых данных

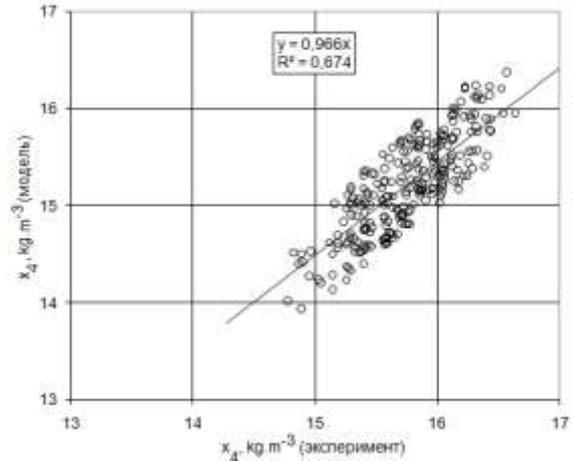


Рис. 15. Корреляция реальных данных – x_4 и расчетов x_4 по ИНС-модели для нейронной сети, показанной на рис. 12. Изображена корреляционная зависимость для 250 первых данных

Весовые коэффициенты ИНС-модели (рис. 12) для расчета s_1 приведены ниже:

0.4288162291 0.6911659837 0.1684842408 0.4616163075 0.7723379135 0.4216362238 0.9884165525 0.9788873196
 0.6507799029 0.9671633244 0.5300018191 0.01564698666 0.3375403881 0.2216714323 0.4493710399 0.7133677006
 0.5164060593 0.06919586658 0.4069945812 0.370903194 0.505251348 0.1388458759 0.4709280729 0.6744026542
 0.6213706732 0.07822722197 0.8713401556 0.3879356384 0.5161554813 0.8892344236 0.1537122428 0.1915409863
 0.5621814728 0.5658055544 0.9058300853 0.5828891993 0.995773077 0.9083153009 0.8174400926 0.6529616714
 0.1239705533 0.3195488155 0.9493271112 0.4367306828 0.8182460666 0.6685219407 0.4569704831 0.3795740008
 0.9782751203 0.8832216859 0.9629584551 0.4627134502 0.2770597935 0.4101133347 0.1543281227 0.9040151834
 0.7805030942 0.3157556355 0.2891126871 0.5657803416 0.1679721922 0.4115138948 0.7431307435 0.7208458185
 0.267467916 0.8945841193 0.5835685134 0.2519495189 0.07455415279 0.384468019 0.1137303263 0.3678540885
 0.9564149976 0.01722002774 0.8362314701 0.78604424 -0.2695320249 0.5538398623 0.4061145186 -0.01418774575
 0.673956871 0.5876576304 0.4519741535 0.9328891635 0.04772821069 0.8873259425 0.1167072952 0.8477321267
 0.2128166556 0.4433260858 0.3933708966 0.396352917 0.1390984654 0.3976278305 0.375639379

Весовые коэффициенты ИНС-модели (рис. 12) для расчета s_4 :

-0.5704417825 -0.3067550063 -0.8308624625 0.4633195698 0.7747497559 -0.5769819021 0.9883269072 -0.02421592176
 0.651948154 -0.03596661985 -0.4777849317 0.03908353299 -0.6614277363 -0.7468106151 -0.5182107091 -0.2548091412
 -0.479221344 -0.9636934996 -0.5867102146 -0.6539791226 0.4907354712 -0.842656672 0.4675816298 -0.3012738824
 0.647780776 -0.8964956403 0.8684352636 0.3658132553 -0.4878232479 -0.1296569407 -0.9198666215 -0.5133520961
 0.5029249191 0.5552321672 0.1379725337 -0.2230418921 0.8237388134 -0.05016455799 -0.3082303703 0.6203956008
 0.110185191 0.3382017314 0.9468284845 0.4570706487 -0.1558273286 0.6927443147 0.4551470578 0.3587762713
 -0.02263088711 0.86644274 -0.0193118006 -0.520377934 0.250112772 -0.0408744812 0.1773202568 -0.2229760885
 0.6667154431 -0.5945608616 -0.5990222692 0.5554787517 0.1193605512 -0.3891767859 0.7373982072 -0.3085044324
 0.384406507 0.911829412 -0.4308186471 0.2650654018 -0.7632086873 0.3955869079 -0.8295327425

Весовые коэффициенты ИНС-модели (рис. 12) для расчета x_4 :

-0.5694060922 -0.307300508 -0.8305162787 0.462882787 0.7741994858 -0.5763953924 0.9889353514 -0.02372954786
 0.6522523761 -0.03583501279 -0.381878674 -0.01728148013 -0.636954546 -0.7451941371 -0.5691607594 -0.2912786007
 -0.4150056839 -0.9485729933 -0.5316421986 -0.6321180463 0.4832786918 -0.8323836923 0.4667853117 -0.3034873605
 0.6527198553 -0.8909805417 0.8609946966 0.3653144836 -0.492610693 -0.1329366267 -0.8492556214 -0.5841318965
 0.500246048 0.5419026613 0.06970185786 -0.2706416845 0.8380429745 -0.1023810878 -0.2908897102 0.5919341445
 0.1276708096 0.3295662105 0.9494491816 0.4543088078 -0.1653430909 0.6837120652 0.4659579098 0.3602868915
 -0.01319523342 0.8676882386 -0.03200615942 -0.4333055615 0.1920378208 -0.07105731964 0.1847007424
 -0.138266921 0.6991356015 -0.6002905369 -0.6089967489 0.5872494578 0.1409412473 -0.4160847068 0.7910585999
 -0.2642692029 0.3661999106 0.9121851325 -0.4759331644 0.2709161937 -0.812210381 0.3853225112 -0.8021785021

Сравнение времени выполнения программы на единичном процессоре и вычислительном кластере показало, что существенная доля временных затрат получения ИНС-модели экспертной системы приходится на поиск структуры сети.

Таким образом, проектирование экспертной системы для производственного процесса выработки биомассы подтвердило возможность предложенной в [1–3] технологии разработки интеллектуального ядра, базируемого на ИНС-моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасцев А.А., Неудахин А.В. Методика разработки экспертных систем, использующих в качестве интеллектуального ядра ИНС-модели // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2008. Т. 13. Вып. 2-3. С. 219-222.
2. Арзамасцев А.А., Неудахин А.В., Зенкова Н.А. Автоматизированная технология построения экспертных систем с интеллектуальным ядром на основе ИНС-моделей // Открытое образование. 2008. Вып. 3 (68). С. 35-39.
3. Арзамасцев А.А., Неудахин А.В. Автоматизированная технология построения экспертных информационных систем // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2008. Т. 13. Вып. 1. С. 83-85.
4. Арзамасцев А.А. Математическое и компьютерное моделирование. Тамбов: Издат. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2010. 257 с.
5. Арзамасцев А.А., Плотникова Ю.В. Информационная система для оптимизации биотехнологического процесса на основе методов математического моделирования // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2008. Т. 13. Вып. 5. С. 376-393.
6. Арзамасцев А.А., Плотникова Ю.В. Оптимизация биотехнологического процесса утилизации отходов производства этанола на основе методов математического моделирования // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2011. Т. 16. Вып. 1. С. 174-179.

7. Арзамасцев А.А., Рыков В.П., Крючин О.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Симулятор искусственной нейронной сети с реализацией модульного принципа обучения». № 2012618141, зарегистр. в ФГБУ ФИПС 07.09.2012 г.
8. Арзамасцев А.А., Крючин О.В., Кващенко О.Д., Зенкова Н.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Инструмент хранения информации для экспертных систем, базирующихся на искусственных нейронных сетях на основе СУБД Postgree (DBInteractor)». № 2012612513, зарегистр. в ФГБУ ФИПС 11.01.2012 г.
9. Арзамасцев А.А., Крючин О.В., Банников С.С., Зенкова Н.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Сервер взаимодействия ядра экспертной системы с пользователями». № 2012612512, зарегистр. в ФГБУ ФИПС 11.01.2012 г.

БЛАГОДАРНОСТИ:

1. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, 2011–2012. Проект: «Разработка автоматизированной технологии и программно-технологического комплекса для построения экспертных систем для различных сфер деятельности, включающей оригинальные способы и программные механизмы разработки экспертных систем, поддерживающих распределенный ввод данных, параллельные вычисления и имеющих интеллектуальное ядро, основанное на нейросетевых моделях» (НИОКР № 8894п/14330).

2. Выражаем благодарность к.т.н. О.В. Крючину, С.С. Банникову, О.Д. Кващенко за большой вклад в разработку программного обеспечения и помощь в проведении вычислительных экспериментов.

Поступила в редакцию 2 апреля 2016 г.

UDC 004.89

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-2-642-649

EXPERT SYSTEM FOR INDUSTRIAL PROJECT BASING ON ANN-MODELS

©A.A. Arzamastsev, N.A. Zenkova

The article describes basic stages of expert system basing on intelligent heart, presenting mathematical model of object, developed with the use of artificial neural networks and empirical data.

Key words: expert system; ANN-model; artificial neural networks.

REFERENCES

1. Arzamastsev A.A., Neudakhin A.V. Metodika razrabotki ekspertnykh sistem, ispol'zuyushchikh v kachestve intellektual'nogo yadra INS-modeli. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, Tambov, 2008, vol. 13, no. 2-3, pp. 219-222.
2. Arzamastsev A.A., Neudakhin A.V., Zenkova N.A. Avtomatizirovannaya tekhnologiya postroeniya ekspertnykh sistem s intellektual'nym yadrom na osnove INS-modeley. *Otkrytoe obrazovanie*, 2008, no. 3 (68), pp. 35-39.
3. Arzamastsev A.A., Neudakhin A.V. Avtomatizirovannaya tekhnologiya postroeniya ekspertnykh informatsionnykh sistem. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, Tambov, 2008, vol. 13, no. 1, pp. 83-85.
4. Arzamastsev A.A. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie*. Tambov, Publishing House of Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2010. 257 p.
5. Arzamastsev A.A., Plotnikova Yu.V. Informatsionnaya sistema dlya optimizatsii biotekhnologicheskogo protsessa na osnove metodov matematicheskogo modelirovaniya. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, Tambov, 2008, vol. 13, no. 5, pp. 376-393.

6. Arzamastsev A.A., Plotnikova, Yu.V. Optimizatsiya biotekhnologicheskogo protsessa utilizatsii otkhodov proizvodstva etanola na osnove metodov matematicheskogo modelirovaniya. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, Tambov, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 174-179.
7. Arzamastsev A.A., Rykov V.P., Kryuchin O.V. *State registration certificate of program for EVM «Simulyator iskusstvennoy neyronnoy seti s realizatsiey modul'nogo printsipa obucheniya»*. № 2012618141, registered in FIPS 7 September 2012.
8. Arzamastsev A.A., Kryuchin O.V., Kvashenkin O.D., Zenkova N.A. *State registration certificate of program for EVM «Instrument khraneniya informatsii dlya ekspertnykh sistem, baziruyushchikhsya na iskusstvennykh neyronnykh setyakh na osnove SUBD Postgree (DBInteractor)»*. № 2012612513, registered in FIPS 11 January 2012.
9. Arzamastsev A.A., Kryuchin O.V., Bannikov S.S., Zenkova N.A. *State registration certificate of program for EVM «Server vzaimodeystviya yadra ekspertnoy sistemy s pol'zovatelyami»*. № 2012612512, registered in FIPS 11 January 2012.

GRATITUDE:

1. The work is fulfilled under support of Fund of minor forms of enterprises assistance in scientific-technical sphere, 2011–2012. Project: “Development of automate technology and program-technological complex for building expert systems for different spheres of activity, including original ways and program mechanisms of expert systems development, supporting distributed data input, parallel computations and having intelligent heart, based on neural network models” (НИОКР № 8894п/14330).

2. We thank Candidates of Technics O.V. Kryuchina, S.S. Bannikova, O.D. Kvashenkina for great input in development of content solution and help in carrying out modeling exercise.

Received 2 April 2016

Арзамасцев Александр Анатольевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой математического моделирования и информационных технологий, e-mail: arz_sci@mail.ru

Arzamastsev Aleksander Anatolevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Head of Mathematical Modeling and Information Technologies Department, e-mail: arz_sci@mail.ru

Зенкова Наталья Александровна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат психологических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, e-mail: arz_sci@mail.ru

Zenkova Natalya Aleksandrovna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Psychology, Associate Professor of Mathematical Modeling and Information Technologies Department, e-mail: arz_sci@mail.ru