Синхронный анализ временных рядов при оценке взаимовлияния скважин и связанности пластовых систем

Р.Р. Бахитов¹

¹Уфимский гос. нефтяной технический университет

Адрес для связи: rinatb@mail.ru

Ключевые слова: временные ряды, синхронный анализ, коинтеграция.

Ввод в эксплуатацию трудноизвлекаемых запасов требует применения современных цифровых технологий анализа данных, позволяющих извлечь из множества динамических параметров ценную информацию о производственных показателях пласта, включая данные о направлениях фильтрационных потоков и анизотропии геологических свойств его продуктивности. Для построения адекватных моделей описания, основанных на истории поведения окружающих нагнетательных (и добывающих) скважин целесообразно проводить синхронный анализ временных рядов производственных показателей работы всех скважин. В научной работе приведены результаты апробирования инструментов прогнозирования, базирующихся на использовании исторических данных об ежедневной динамике добычи нефти, дебита жидкости, забойного давления, пластового давления и ряда разницы давлений для всех добывающих и нагнетательных скважин месторождения.

Synchronous analysis of time series in estimating well interaction and connection of formation systems

R.R. Bakhitov¹

¹Ufa State Oil Technical University

E-mail: rinatb@mail.ru

Keywords: time series, synchronous analysis, co-integration.

The commissioning of hard-to-recover reserves requires the use digital technologies such as data analysis, which provides an opportunity to extract from a variety of dynamic parameters valuable information on reservoir performance, including data on the directions of filtration flows and the anisotropy of the geological properties of its productivity. To build up an adequate description of a model based on the history of the behaviour of the surrounding injection (and production) wells, it makes sense to carry out a synchronous approach in terms of the time series of production indicators of all wells. The scientific work presents the results of testing forecasting tools based on the use of historical data on the daily dynamics of oil production, fluid flow rate, bottom hole pressure, reservoir pressure and a number of pressure differences for all production and injection wells of the oil field.

Времена легкодоступной нефти постепенно подходят к своему завершению и логичным продолжением этой историей является применение современных математических подходов и цифровых технологий в процессе разработки нефтяных месторождений [1]. Такой подход позволяет структурировать производственные данные и выявить определенные закономерности как в распределении фильтрационно-емкостных свойств породы-коллектора, так и в процессе разработки нефтяных месторождений [2-4]. Все это в свою очередь дает возможность лучше организовать производственный процесс с учетом

экономики проекта и повысить эффективность выработки трудноизвлекаемых запасов нефти [5,6]. В данной статье были рассмотрены динамические показатели, такие как добыча нефти, дебит жидкости, забойное и пластовое давления и ряд разницы давлений для всех добывающих и нагнетательных скважин месторождения “Х”. Рассмотрение вышеприведенных показателей с помощью применения синхронного анализа было выполнено в несколько этапов.

Первый этап синхронного анализа заключается в выявлении типа динамических рядов с использованием процедур Доладо-Дженкинсона-Сосвила-Риверо. С помощью расширенного теста Дики-Фуллера тестируются следующие уравнения спецификации: процесс нулевого и первого порядков интегрирования с детерминированным линейным трендом; процесс нулевого, первого и второго порядка интегрирования.

Во всех этих спецификациях нулевой гипотезой является предположение о том, что коэффициент при соответствующих разностях равен нулю. Принятие соответствующего решения осуществляется на основе проверки сложной гипотезы, как пересечения пяти представленных гипотез. Расчетное значение получаемых t -статистик сравнивается с критическим значением Мак-Кинона, что в итоге дает основу для принятия решения о типе случайного процесса [4-6].

Второй этап синхронного анализа заключается в уточнении типа процесса уже с учетом возможных структурных изменений ряда (например, остановки работы скважины, проведение мероприятий по интенсификации добычи нефти и др.) с использованием теста Перрона [7]. Для этого выполняются определенные виды тестирования, т. е. проверяется гипотеза - процесс первого порядка интегрирования и гипотезы – процесс с детерминированным трендом. Для определения точки излома и/или скачка тенденции используется тест Квандта-Эндрюса, в котором нулевой гипотезой

предполагается отсутствие точки излома в каждой точке временного ряда.

Все временные ряды, основанные на ежедневной динамике добычи нефти, дебита жидкости, забойного и пластового давлений и ряда разницы давлений для всех добывающих и нагнетательных скважин исследуемого месторождения протестированы согласно процедуре Доладо-Дженкинсона-Сосвила-Риверо и уточнены с помощью тестов Квандта-Эндрюса и Перрона. Распределение по типам процессов по всем исследуемым временным рядам месторождения приведено в табл. 1.

Таблица 1

	TS + DS(I(1))	TS+DS(I(0))	DS(I(2))	DS(I(1))	DS(I(0))
Добыча нефти	1	8	3	16	56
Дебит жидкости	0	1	8	9	66
Забойное давление	0	1	12	5	66
Пластовое давление	0		23	51	10
Разница давлений	0	1	15	9	59

Результаты расчетов показывают, что подавляющее большинство динамических показателей эксплуатации скважин исследуемого месторождения относятся к процессам $DS(I(0))$, т. е. по сути являются стационарными случайными процессами в широком смысле, даже при наличии структурных скачков. Выявлен незначительный ряд скважин с типом процесса TS, т.е. есть наличие тренда. Полученный результат говорит о том, что для

рядов $DS(I(0))$ наилучшим прогнозом будет прогноз, основанный на продлении динамики обычной константой - метод «протяжки последнего значения ряда динамики». Дальнейшие численные эксперименты это подтвердили.

Третий этап – проверка коинтеграции. Проверка условия коинтеграции необходима для построения динамических моделей взаимовлияния скважин, а также возможности выявления корректной спецификации моделей. Для проверки нулевой гипотезы об отсутствии коинтеграции по тесту Ингла-Гренджера оценивается коинтеграционное соотношение, как линейная регрессия $y_t = \bar{\alpha} + \bar{\beta} \cdot x_t + \varepsilon_t$, где x_t, y_t временные ряды. Затем остатки ε_t тестируются на стационарность с помощью теста Дики-Фуллера [8]. Необходимым условием для использования теста на коинтеграцию является то, что ряды должны относиться к одному и тому же типу случайных дискретных процессов. При выполнении обоих условий временные ряды x_t и y_t являются коинтегрированными. В тесте для переменных вероятность ошибки отклонения нулевой гипотезы сразу рассчитывается на основе сравнения расчетных значений τ -статистик и z -статистик со значениями, уточненными Мак-Киноном [9]. В качестве целевых переменных в тесте используются добыча нефти и дебит жидкости, в качестве предикторов - забойное давление, пластовое давление и разница давлений. Особенностью теста является то, что можно проверить уравнение, в которое добавлена авторегрессия до задаваемого лага запаздывания включительно. Таким образом, тест на коинтеграцию может стать основой для выбора оптимальной спецификации модели описания взаимного влияния скважин, чтобы учесть отсроченное влияние таких характеристик, как добыча по соседним скважинам и влияние изменения давления на дебит жидкости (или нефти) добывающей скважины. Результаты тестирования на коинтеграцию согласно критерию Ингла-Гренджера по скв. 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000, 1001, 1002, 1003, 1004, 1005, 1006, 1007, 1008, 1009, 1010, 1011, 1012, 1013, 1014, 1015, 1016, 1017, 1018, 1019, 1020, 1021, 1022, 1023, 1024, 1025, 1026, 1027, 1028, 1029, 1030, 1031, 1032, 1033, 1034, 1035, 1036, 1037, 1038, 1039, 1040, 1041, 1042, 1043, 1044, 1045, 1046, 1047, 1048, 1049, 1050, 1051, 1052, 1053, 1054, 1055, 1056, 1057, 1058, 1059, 1060, 1061, 1062, 1063, 1064, 1065, 1066, 1067, 1068, 1069, 1070, 1071, 1072, 1073, 1074, 1075, 1076, 1077, 1078, 1079, 1080, 1081, 1082, 1083, 1084, 1085, 1086, 1087, 1088, 1089, 1090, 1091, 1092, 1093, 1094, 1095, 1096, 1097, 1098, 1099, 1100, 1101, 1102, 1103, 1104, 1105, 1106, 1107, 1108, 1109, 1110, 1111, 1112, 1113, 1114, 1115, 1116, 1117, 1118, 1119, 1120, 1121, 1122, 1123, 1124, 1125, 1126, 1127, 1128, 1129, 1130, 1131, 1132, 1133, 1134, 1135, 1136, 1137, 1138, 1139, 1140, 1141, 1142, 1143, 1144, 1145, 1146, 1147, 1148, 1149, 1150, 1151, 1152, 1153, 1154, 1155, 1156, 1157, 1158, 1159, 1160, 1161, 1162, 1163, 1164, 1165, 1166, 1167, 1168, 1169, 1170, 1171, 1172, 1173, 1174, 1175, 1176, 1177, 1178, 1179, 1180, 1181, 1182, 1183, 1184, 1185, 1186, 1187, 1188, 1189, 1190, 1191, 1192, 1193, 1194, 1195, 1196, 1197, 1198, 1199, 1200, 1201, 1202, 1203, 1204, 1205, 1206, 1207, 1208, 1209, 1210, 1211, 1212, 1213, 1214, 1215, 1216, 1217, 1218, 1219, 1220, 1221, 1222, 1223, 1224, 1225, 1226, 1227, 1228, 1229, 1230, 1231, 1232, 1233, 1234, 1235, 1236, 1237, 1238, 1239, 1240, 1241, 1242, 1243, 1244, 1245, 1246, 1247, 1248, 1249, 1250, 1251, 1252, 1253, 1254, 1255, 1256, 1257, 1258, 1259, 1260, 1261, 1262, 1263, 1264, 1265, 1266, 1267, 1268, 1269, 1270, 1271, 1272, 1273, 1274, 1275, 1276, 1277, 1278, 1279, 1280, 1281, 1282, 1283, 1284, 1285, 1286, 1287, 1288, 1289, 1290, 1291, 1292, 1293, 1294, 1295, 1296, 1297, 1298, 1299, 1300, 1301, 1302, 1303, 1304, 1305, 1306, 1307, 1308, 1309, 1310, 1311, 1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 1317, 1318, 1319, 1320, 1321, 1322, 1323, 1324, 1325, 1326, 1327, 1328, 1329, 1330, 1331, 1332, 1333, 1334, 1335, 1336, 1337, 1338, 1339, 1340, 1341, 1342, 1343, 1344, 1345, 1346, 1347, 1348, 1349, 1350, 1351, 1352, 1353, 1354, 1355, 1356, 1357, 1358, 1359, 1360, 1361, 1362, 1363, 1364, 1365, 1366, 1367, 1368, 1369, 1370, 1371, 1372, 1373, 1374, 1375, 1376, 1377, 1378, 1379, 1380, 1381, 1382, 1383, 1384, 1385, 1386, 1387, 1388, 1389, 1390, 1391, 1392, 1393, 1394, 1395, 1396, 1397, 1398, 1399, 1400, 1401, 1402, 1403, 1404, 1405, 1406, 1407, 1408, 1409, 1410, 1411, 1412, 1413, 1414, 1415, 1416, 1417, 1418, 1419, 1420, 1421, 1422, 1423, 1424, 1425, 1426, 1427, 1428, 1429, 1430, 1431, 1432, 1433, 1434, 1435, 1436, 1437, 1438, 1439, 1440, 1441, 1442, 1443, 1444, 1445, 1446, 1447, 1448, 1449, 1450, 1451, 1452, 1453, 1454, 1455, 1456, 1457, 1458, 1459, 1460, 1461, 1462, 1463, 1464, 1465, 1466, 1467, 1468, 1469, 1470, 1471, 1472, 1473, 1474, 1475, 1476, 1477, 1478, 1479, 1480, 1481, 1482, 1483, 1484, 1485, 1486, 1487, 1488, 1489, 1490, 1491, 1492, 1493, 1494, 1495, 1496, 1497, 1498, 1499, 1500, 1501, 1502, 1503, 1504, 1505, 1506, 1507, 1508, 1509, 1510, 1511, 1512, 1513, 1514, 1515, 1516, 1517, 1518, 1519, 1520, 1521, 1522, 1523, 1524, 1525, 1526, 1527, 1528, 1529, 1530, 1531, 1532, 1533, 1534, 1535, 1536, 1537, 1538, 1539, 1540, 1541, 1542, 1543, 1544, 1545, 1546, 1547, 1548, 1549, 1550, 1551, 1552, 1553, 1554, 1555, 1556, 1557, 1558, 1559, 1560, 1561, 1562, 1563, 1564, 1565, 1566, 1567, 1568, 1569, 1570, 1571, 1572, 1573, 1574, 1575, 1576, 1577, 1578, 1579, 1580, 1581, 1582, 1583, 1584, 1585, 1586, 1587, 1588, 1589, 1590, 1591, 1592, 1593, 1594, 1595, 1596, 1597, 1598, 1599, 1600, 1601, 1602, 1603, 1604, 1605, 1606, 1607, 1608, 1609, 1610, 1611, 1612, 1613, 1614, 1615, 1616, 1617, 1618, 1619, 1620, 1621, 1622, 1623, 1624, 1625, 1626, 1627, 1628, 1629, 1630, 1631, 1632, 1633, 1634, 1635, 1636, 1637, 1638, 1639, 1640, 1641, 1642, 1643, 1644, 1645, 1646, 1647, 1648, 1649, 1650, 1651, 1652, 1653, 1654, 1655, 1656, 1657, 1658, 1659, 1660, 1661, 1662, 1663, 1664, 1665, 1666, 1667, 1668, 1669, 1670, 1671, 1672, 1673, 1674, 1675, 1676, 1677, 1678, 1679, 1680, 1681, 1682, 1683, 1684, 1685, 1686, 1687, 1688, 1689, 1690, 1691, 1692, 1693, 1694, 1695, 1696, 1697, 1698, 1699, 1700, 1701, 1702, 1703, 1704, 1705, 1706, 1707, 1708, 1709, 1710, 1711, 1712, 1713, 1714, 1715, 1716, 1717, 1718, 1719, 1720, 1721, 1722, 1723, 1724, 1725, 1726, 1727, 1728, 1729, 1730, 1731, 1732, 1733, 1734, 1735, 1736, 1737, 1738, 1739, 1740, 1741, 1742, 1743, 1744, 1745, 1746, 1747, 1748, 1749, 1750, 1751, 1752, 1753, 1754, 1755, 1756, 1757, 1758, 1759, 1760, 1761, 1762, 1763, 1764, 1765, 1766, 1767, 1768, 1769, 1770, 1771, 1772, 1773, 1774, 1775, 1776, 1777, 1778, 1779, 1780, 1781, 1782, 1783, 1784, 1785, 1786, 1787, 1788, 1789, 1790, 1791, 1792, 1793, 1794, 1795, 1796, 1797, 1798, 1799, 1800, 1801, 1802, 1803, 1804, 1805, 1806, 1807, 1808, 1809, 1810, 1811, 1812, 1813, 1814, 1815, 1816, 1817, 1818, 1819, 1820, 1821, 1822, 1823, 1824, 1825, 1826, 1827, 1828, 1829, 1830, 1831, 1832, 1833, 1834, 1835, 1836, 1837, 1838, 1839, 1840, 1841, 1842, 1843, 1844, 1845, 1846, 1847, 1848, 1849, 1850, 1851, 1852, 1853, 1854, 1855, 1856, 1857, 1858, 1859, 1860, 1861, 1862, 1863, 1864, 1865, 1866, 1867, 1868, 1869, 1870, 1871, 1872, 1873, 1874, 1875, 1876, 1877, 1878, 1879, 1880, 1881, 1882, 1883, 1884, 1885, 1886, 1887, 1888, 1889, 1890, 1891, 1892, 1893, 1894, 1895, 1896, 1897, 1898, 1899, 1900, 1901, 1902, 1903, 1904, 1905, 1906, 1907, 1908, 1909, 1910, 1911, 1912, 1913, 1914, 1915, 1916, 1917, 1918, 1919, 1920, 1921, 1922, 1923, 1924, 1925, 1926, 1927, 1928, 1929, 1930, 1931, 1932, 1933, 1934, 1935, 1936, 1937, 1938, 1939, 1940, 1941, 1942, 1943, 1944, 1945, 1946, 1947, 1948, 1949, 1950, 1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956, 1957, 1958, 1959, 1960, 1961, 1962, 1963, 1964, 1965, 1966, 1967, 1968, 1969, 1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 214

забойного, пластового давлений и разницы давлений также приведены в табл. 2. Здесь в тесте F_1 - статистика теста, где переменной объясняющая переменная (фактор, предиктор) является причиной для целевой, F_2 - статистика теста, где целевая переменная является причиной для объясняющей переменной (фактора). Также проведены тесты на причинность между текущим дебитом нефти и дебитом нефти соседних по кусту скважин с учетом лага запаздывания. Рассматривались тесты на причинность между текущим дебитом жидкости текущей и дебитом жидкости соседних по кусту скважин с учетом лага запаздывания.

Таблица 2. Тесты на причинность по Гренджеру между соседними скважинами

Номер скважины	Целевая переменная - дебит нефти	Целевая переменная - дебит жидкости
9	$F_1 = 6.303; p = 0,0003,$ $F_2 = 0.928; p = 0,4263$ На добычу нефти скв. 9 влияет добыча скв. 69 только с лагом, равным 3	$F_1 = 41,386; p = 4 * 10^{-8},$ $F_2 = 9,745; p = 6 * 10^{-5}$ На добычу нефти скв. 9 влияет добыча скв. 69 только с лагом, равным 3
10	$F_1 = 2,34; p = 0,0397,$ $F_2 = 3,03; p = 0,0099$ Есть взаимосвязь дебитов между 70 и 11 скв., лаг = 5. $F_1 = 3,29; p = 0,0199,$ $F_2 = 1,00; p = 0,3917$ Есть зависимость между дебитами скв. 11 от дебита скв. 71, лаг равен 3. $F_1 = 1,92; p = 0,0386,$ $F_2 = 5,11; p = 0,0000$ Есть зависимость между	$F_1 = 1,43; p = 0,2333,$ $F_2 = 3,31; p = 0,0194$ Есть взаимосвязь дебита скв. 70 от дебита скв. 11, лаг = 3. $F_1 = 1,52; p = 0,2197,$ $F_2 = 3,76; p = 0,0234$ Есть зависимость между дебитами скв. 71 от дебита скв. 11, лаг равен 2. $F_1 = 9,07; p = 0,0000,$ $F_2 = 2,99; p = 0,0299$ Есть зависимость между

	дебитами между 70 и 71 скв., лаг равен 10.	дебитами между 70 и 71 скв., лаг равен 3.
11	$F_1 = 9,81; p = 0,0000,$ $F_2 = 39,6; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 78 и 74 скв., лаг равен 2. $F_1 = 27,09; p = 0,0000,$ $F_2 = 27,05; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 78 и 21 скв., лаг равен 2. $F_1 = 29,21; p = 0,0000,$ $F_2 = 18,09; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 78 и 79 скв., лаг равен 2. $F_1 = 42,11; p = 0,0000,$ $F_2 = 25,37; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 78 и 84 скв., лаг равен 2. $F_1 = 7,81; p = 0,0004,$ $F_2 = 8,87; p = 0,0001$ Есть зависимость дебитов между 74 и 21 скв., лаг равен 2. $F_1 = 5,68; p = 0,0034,$ $F_2 = 11,38; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 74 и 79 скв., лаг равен 2. $F_1 = 12,06; p = 0,0000,$ $F_2 = 31,61; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между	$F_1 = 3,74; p = 0,0239,$ $F_2 = 1,66; p = 0,1901$ Есть зависимость дебита скв. 78 от дебита скв. 74, лаг равен 2. $F_1 = 6,83; p = 0,0011,$ $F_2 = 9,02; p = 0,0001$ Есть зависимость дебитов между 78 и 21 скв., лаг равен 2. $F_1 = 4,32; p = 0,0134,$ $F_2 = 6,62; p = 0,0014$ Есть зависимость дебитов между 78 и 79 скв., лаг равен 2. $F_1 = 12,53; p = 0,0000,$ $F_2 = 11,44; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 78 и 84 скв., лаг = 2. Между дебитами скважин 74 и 21 нет значимой зависимости при лагах 2-10 $F_1 = 11,23; p = 0,0000, F_2 = 10,77; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 74 и 79 скв., лаг равен 2. $F_1 = 0,66; p = 0,5190,$ $F_2 = 12,23; p = 0,0000$ Есть зависимость дебита между скв.84 и скв. 74, лаг равен 2. $F_1 = 9,27; p = 0,0001,$

	<p>74 и 84 скв., лаг равен 2. $F_1 = 15,43; p = 0,0000, F_2 = 18,08; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 21 и 79 скв., лаг равен 2. $F_1 = 17,2; p = 0,0000, F_2 = 42,1; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 21 и 84 скв., лаг равен 2. $F_1 = 26,83; p = 0,0000, F_2 = 15,26; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 79 и 84 скв., лаг равен 2.</p>	<p>$F_2 = 5,18; p = 0,0057$ Есть зависимость дебитов между 21 и 79 скв., лаг равен 2. $F_1 = 7,31; p = 0,0007, F_2 = 19,43; p = 0,0000$ Есть зависимость дебитов между 21 и 84 скв., лаг равен 2. $F_1 = 5,72; p = 0,0033, F_2 = 8,15; p = 0,0003$ Есть зависимость дебитов между 79 и 84 скв., лаг равен 2.</p>
--	---	--

На четвертом этапе строится динамическая модель, осуществляется проверка теста на причинность, т. е. определения, какая из переменных является эндогенной и экзогенной. Если X_t - причина по Гренджеру для Z_t , то следовательно между этими процессами есть причинно-следственная связь. Для этого используют тест на причинность Гренджера с двумя нулевыми гипотезами: X_t – не является причиной по Гренджеру для Z_t и Z_t , - не является причиной по Гренджеру для X_t .

Для тестирования причинности по Гренджеру строят регрессию Z_t на его собственные предыдущие значения и на предыдущие значения процесса X_t :

$$Z_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i Z_{t-i} + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{t-i} + \varepsilon_t$$

Затем проверяем гипотезы:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_k^2 > 0$$

Проверка гипотезы выполняется на основе расчета F-статистик. Если нулевая гипотеза отвергается, то X_t является причиной для Z_t .

Проведенный анализ позволил выявить спецификации статистических моделей исследуемого месторождения, в частности, провести последующее преобразование временных рядов в соответствии с результатами коинтеграционного анализа. Если ряды относились к одному типу процесса и коинтегрированы, то модель строилась на исходных рядах. Если процессы в модели - зависимая и независимая переменные - относятся к разным типам процесса, то они были преобразованы до одного типа процесса. В случае, если процессы отличаются порядком интегрирования, то один из типов процессов необходимо дифференцировать, т. е. взять разности соответствующих порядков. Если есть детерминированный тренд, то он непосредственно учитывался в предиктивной диагностике.

Список литературы:

1. Мишулина О.А. Статистический анализ и обработка временных рядов. – 2004.
2. Chudinova D.Y. et al. Improvement of oil recovery factor from geological perspectives //Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2021. – №. 2. – С. 17-25.
3. Sultanov S. K. et al. The Influence of Lithofacies Features of a Deposit on the Efficiency of Reserves Recovery //SPE Annual Caspian Technical Conference. – OnePetro, 2021.
4. Айвазян С.А., Ершов Э.Б., Канторович Г.Г. Хрестоматия по продвинутому курсу эконометрики — М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2000.

5. Эконометрика: учебник для магистров / Санкт-Петербургский государственный экономический университет; под ред. И.И. Елисеевой. — Москва: Юрайт, 2014. — 449 с.
6. Uraikov D.S. et al. Conceptualizing a dual porosity occurrence in sandstones by utilizing various laboratory methods //Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2021. – №. 2. – С. 8-16.
7. Perron P. The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis //Econometrica: journal of the Econometric Society. – 1989. – С. 1361-1401.
8. Davidson R., MacKinnon J.G. Several tests for model specification in the presence of alternative hypotheses //Econometrica: Journal of the Econometric Society. – 1981. – С. 781-793.
9. Granger C.W.J. Essays in econometrics: collected papers of Clive WJ Granger. – Cambridge University Press, 2001. – Т. 32.