

Лещенко И.А., Буров М.Н., Чудаков Ю.С.

# Опыт разработки и использования всережимной термодинамической математической модели ТРДД для повышения эффективности решения задачи создания двигателя отечественного регионального самолета



Докладчик: Лещенко Игорь Алексеевич

[igor.leschenko@uec-saturn.ru](mailto:igor.leschenko@uec-saturn.ru)

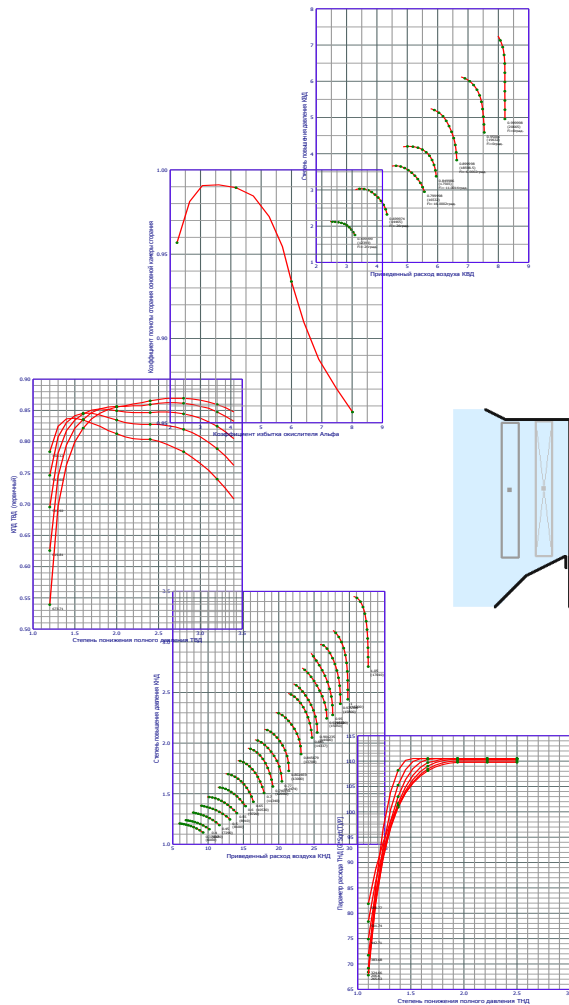


21 апреля 2023 года

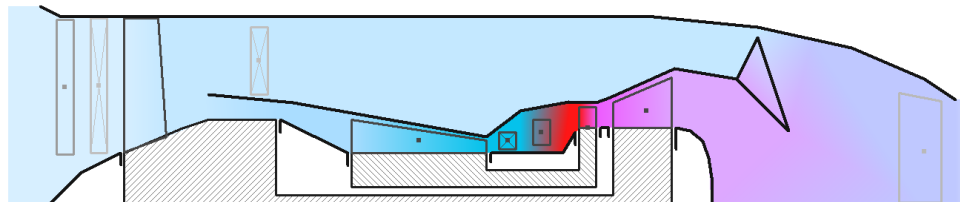
# Классификация математических моделей авиационных двигателей и их элементов



## Характеристики элементов



ММ



## Система нелинейных алгебраических уравнений

$$\Phi(\vec{a}, \vec{u}) = \vec{0}$$

$$\vec{a} = (G_B, \Pi_{КНД1}, \Pi_{КНД2}, m, \Pi_{КВД}, \pi_{ТВД}^*, \pi_{ТНД}^*, G_T, F_{кр})$$

$$\vec{u} = (T_H, p_H, M_H, d, n_1)$$

$$\Phi_1 = \frac{G_B - G_{КНД2}}{G_B} = 0.$$

$$\Phi_2 = \frac{G_B / (1 + m) - G_{с КНД1}}{G_{с КНД1}} = 0.$$

$$\Phi_3 = \frac{G_{сI} - G_{с КВД}}{G_{с КВД}} = 0.$$

$$\Phi_4 = \frac{G_{ОКС} - G_{САТВД}}{G_{САТВД}} = 0;$$

$$\Phi_5 = \frac{G_{ТВД} - G_{САТНД}}{G_{САТНД}} = 0;$$

$$\Phi_6 = \frac{P_{сМ II} - P_{сМ I}}{P_{сМ I}} = 0;$$

$$\Phi_7 = \frac{G_{СМ} - G_{КР}}{G_{СМ}} = 0.$$

$$\Phi_8 = \frac{N_{ТВД} \cdot \eta_{мехВД} - N_{Отб} - N_{КВД}}{N_{ТВД}} = 0.$$

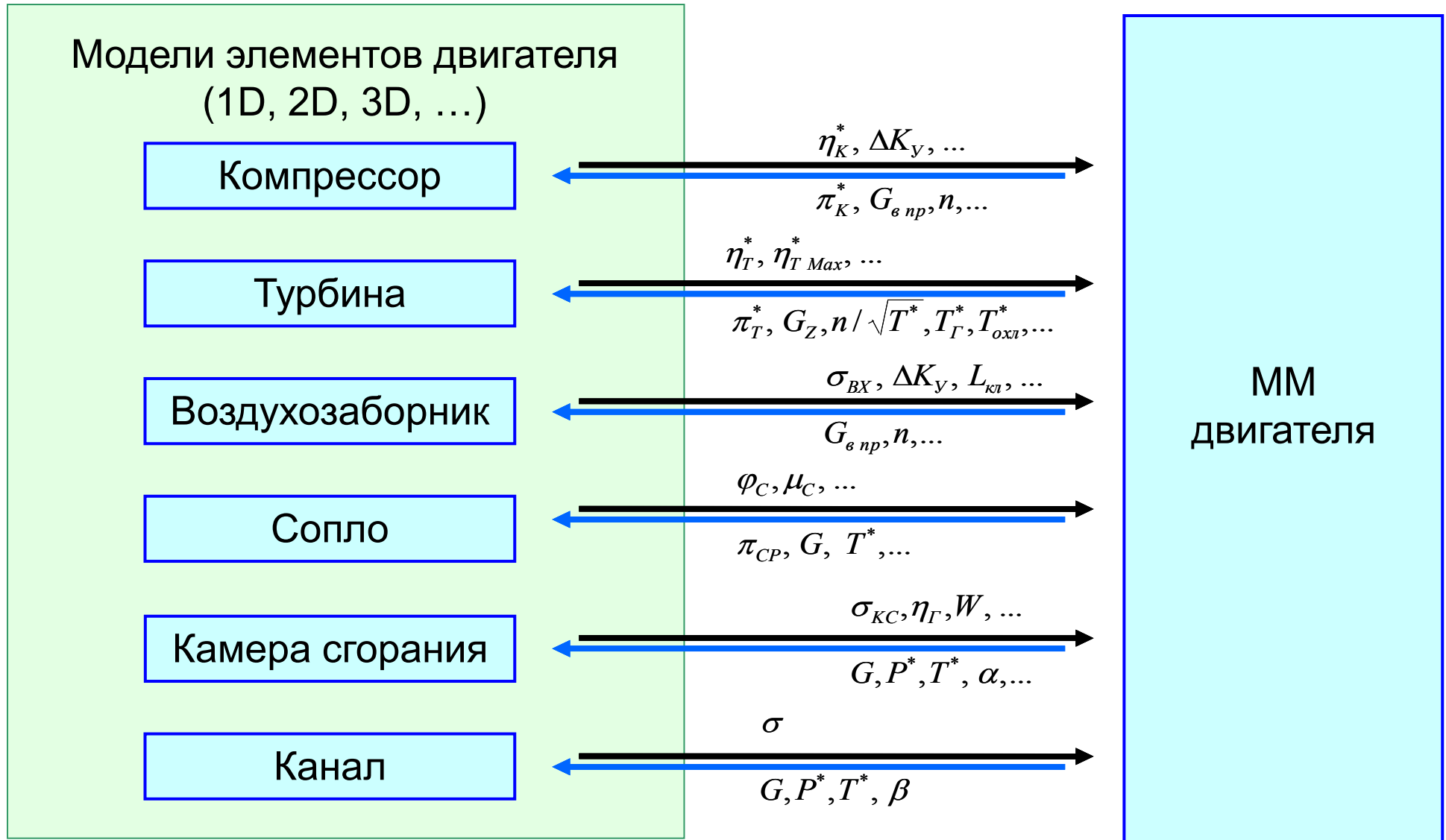
$$\Phi_9 = \frac{N_{ТНД} \cdot \eta_{мехНД} - N_{КНД}}{N_{ТНД}} = 0.$$

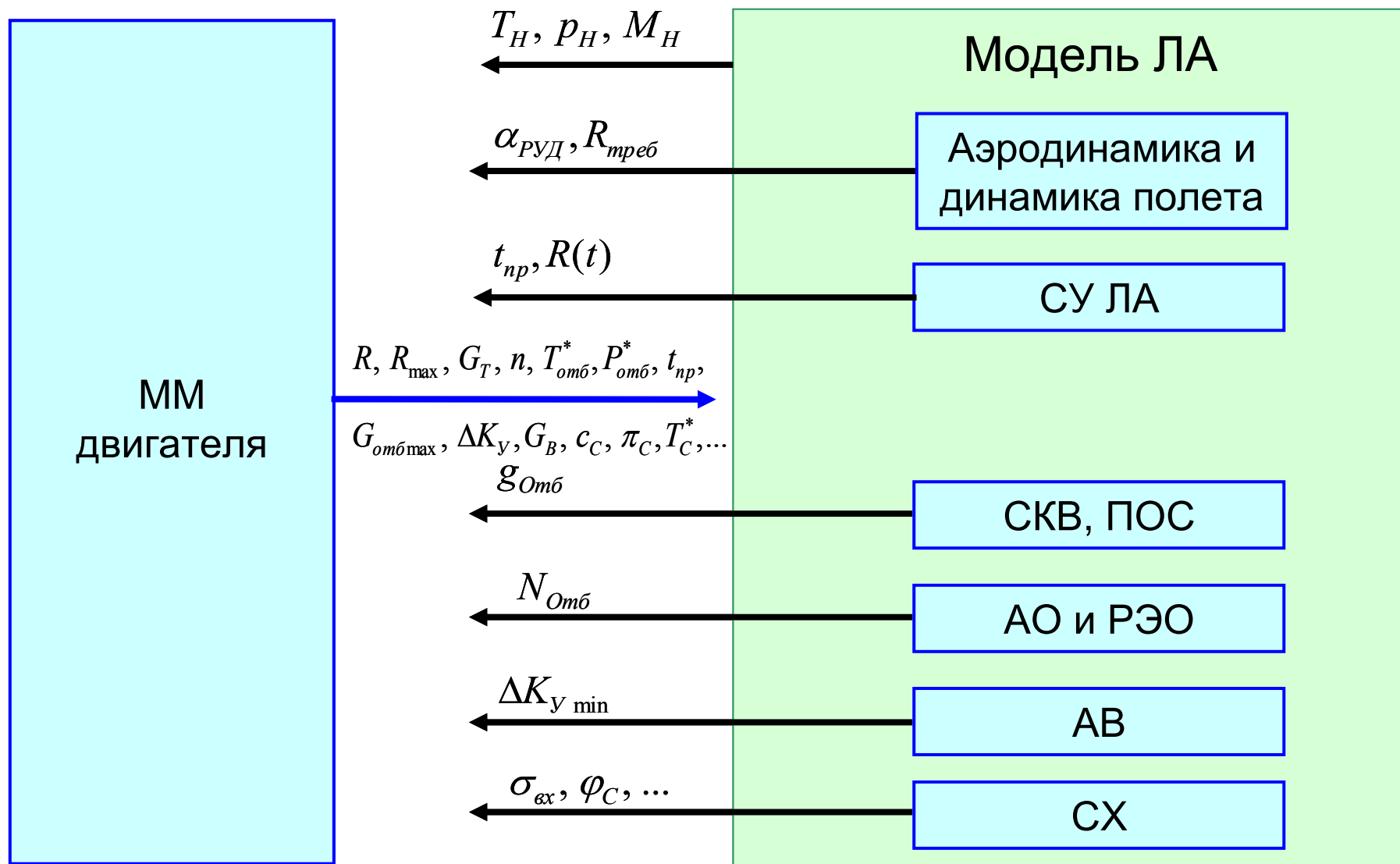
# Области применения термодинамических математических моделей ГТД

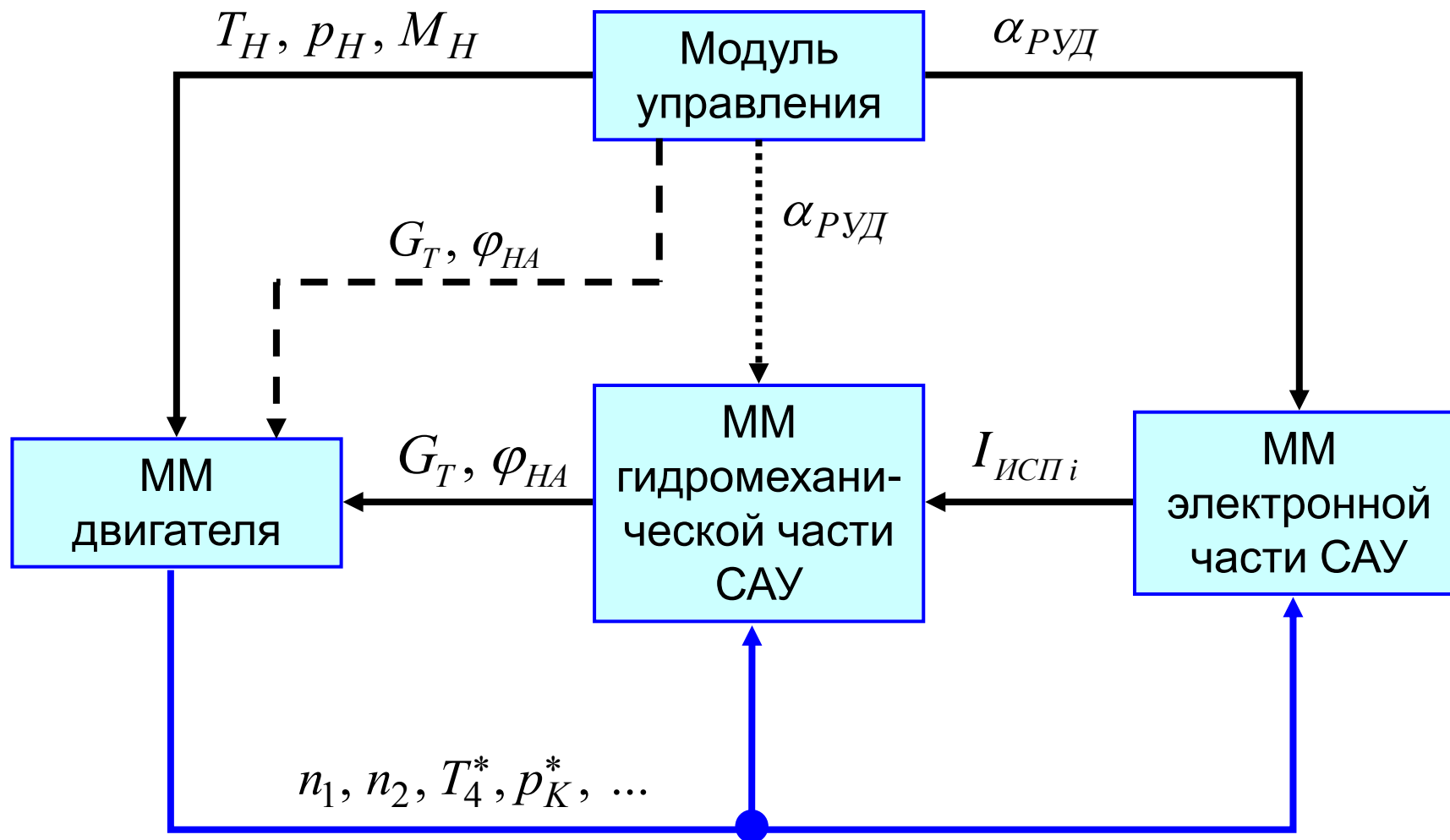


<b>Разработка нового двигателя</b>	Разработка нового двигателя, формирование облика двигателя, параметрический анализ выбранной схемы, формирование программ управления
<b>Параметрическая доводка двигателя, включая летные испытания</b>	Идентификация ММ по результатам эксперимента, формирование ММ двигателя по результатам эксперимента, уточнение характеристик элементов в составе двигателя, уточнение программ управления
<b>Стендовые испытания двигателя</b>	Формирование формул пересчета, отладка двигателя на стенде, разработка программ испытаний
<b>Расчет ДВСХ</b>	Формирование программ управления по углу РУД Расчет ДВСХ с использованием программы управления
<b>Динамические характеристики двигателя</b>	Отработка систем автоматического управления двигателем, обоснование режимов МГ, расчет случаев приемистости, сброса газа и отказов двигателя, исследование особых случаев (раскрутка турбины и др.)
<b>Расчет характеристик ЛА</b>	Передача статической и динамической модели двигателя заказчику, интеграция модели в программные комплексы расчета ЛА, разработка тренажеров
<b>Сопровождение эксплуатации двигателя</b>	Параметрическая диагностика с использованием индивидуальной математической модели двигателя

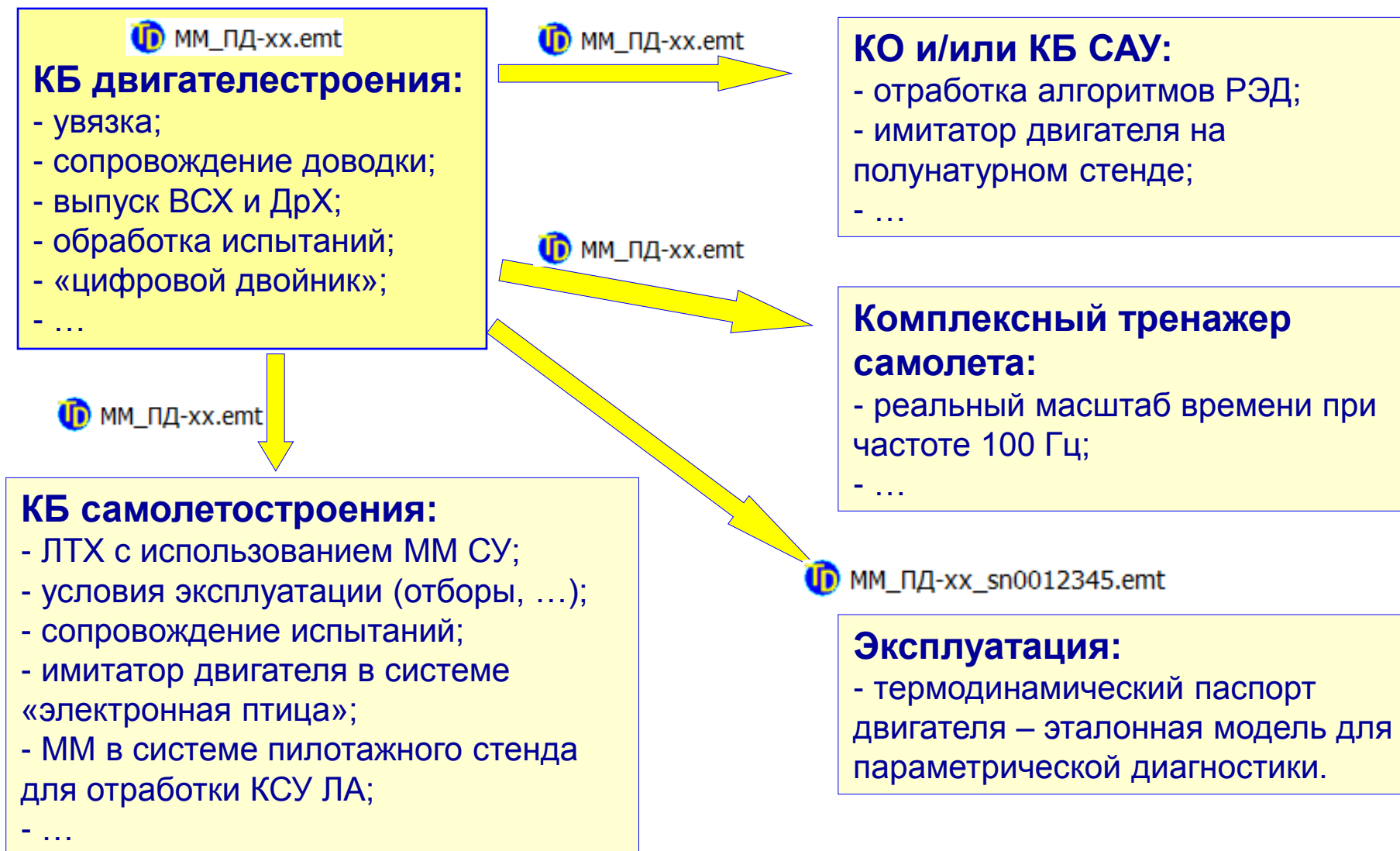
# Комплексная модель «Двигатель+элементы двигателя»





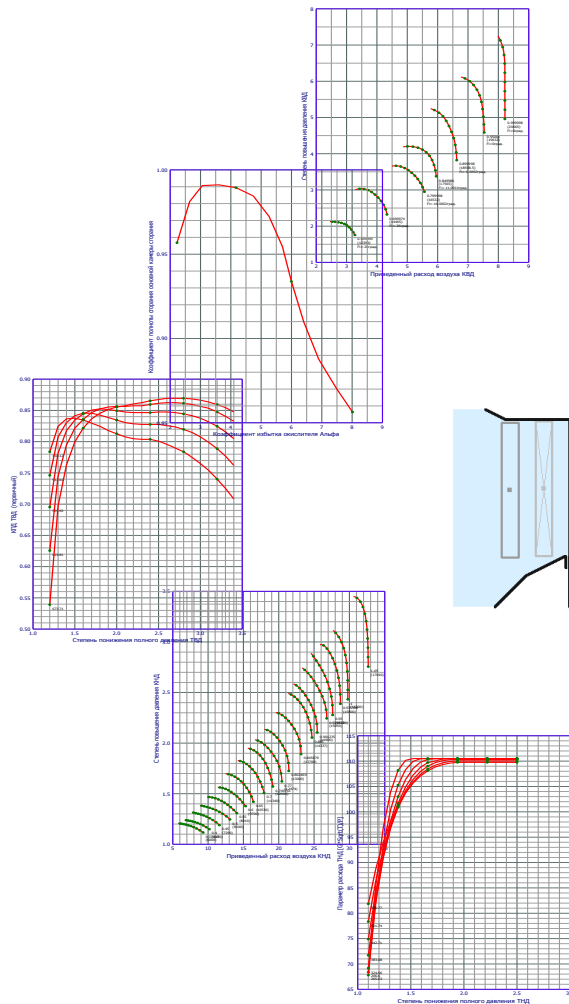


Простая технология поддержания актуального состояния ММ у всех пользователей.

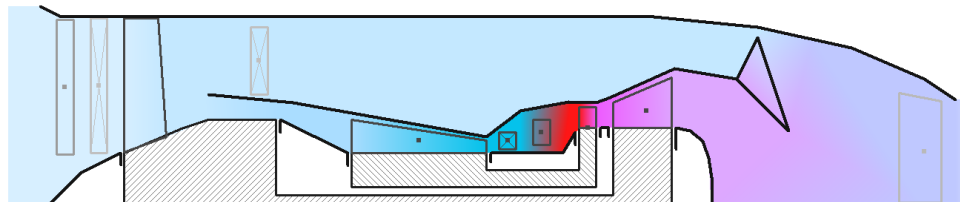




## Характеристики элементов



ММ



## Система нелинейных алгебраических уравнений

$$\Phi(\vec{a}, \vec{u}) = \vec{0}$$

$$\vec{a} = (G_B, \Pi_{КНД1}, \Pi_{КНД2}, m, \Pi_{КВД}, \pi_{ТВД}^*, \pi_{ТНД}^*, G_T, F_{кр})$$

$$\vec{u} = (T_H, p_H, M_H, d, n_1)$$

$$\Phi_1 = \frac{G_B - G_{КНД2}}{G_B} = 0.$$

$$\Phi_2 = \frac{G_B / (1 + m) - G_{с КНД1}}{G_{с КНД1}} = 0.$$

$$\Phi_3 = \frac{G_{сI} - G_{с КВД}}{G_{с КВД}} = 0.$$

$$\Phi_4 = \frac{G_{ОКС} - G_{САТВД}}{G_{САТВД}} = 0;$$

$$\Phi_5 = \frac{G_{ТВД} - G_{САТНД}}{G_{САТНД}} = 0;$$

$$\Phi_6 = \frac{P_{сМ II} - P_{сМ I}}{P_{сМ I}} = 0;$$

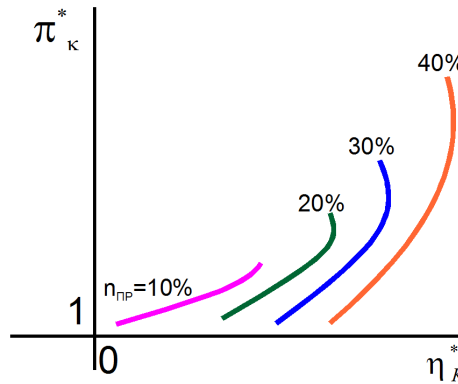
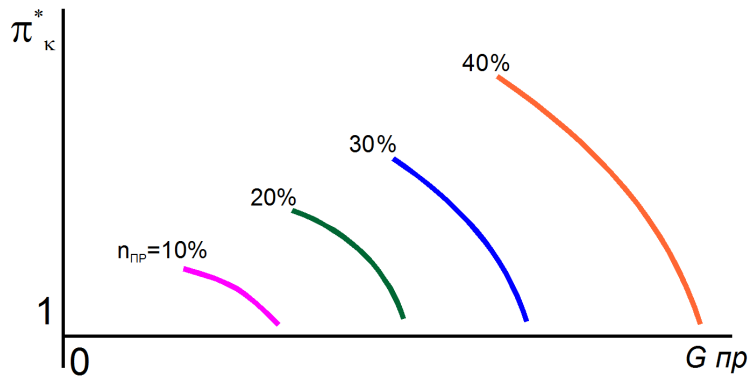
$$\Phi_7 = \frac{G_{СМ} - G_{КР}}{G_{СМ}} = 0.$$

$$\Phi_8 = \frac{N_{ТВД} \cdot \eta_{мехВД} - N_{Отб} - N_{КВД}}{N_{ТВД}} = 0.$$

$$\Phi_9 = \frac{N_{ТНД} \cdot \eta_{мехНД} - N_{КНД}}{N_{ТНД}} = 0.$$

# Моделирование пусковых и авторотационных режимов – проблемы и пути решения

Область работоспособности традиционной формы представления характеристики компрессора

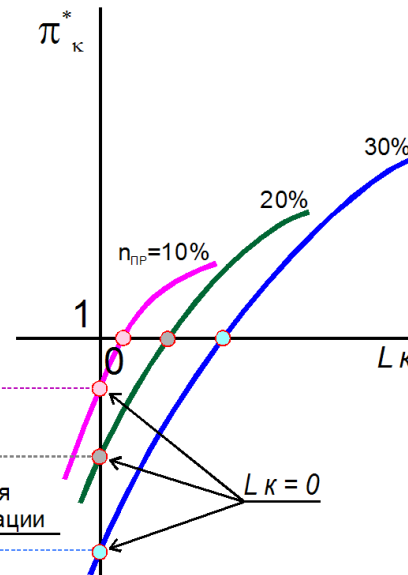
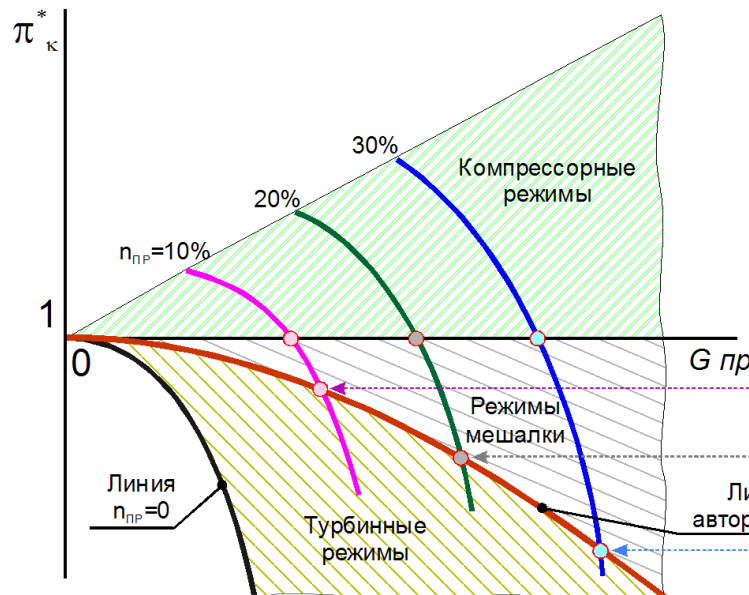


$$L_{K A\partial}^* = c_p \cdot T_B^* \cdot (\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1), \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

$$\eta_K^* = \frac{L_K}{L_{K A\partial}^*}$$

$$L_K = L_{K A\partial}^* / \eta_K^*, \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

Область возможных режимов работы компрессора



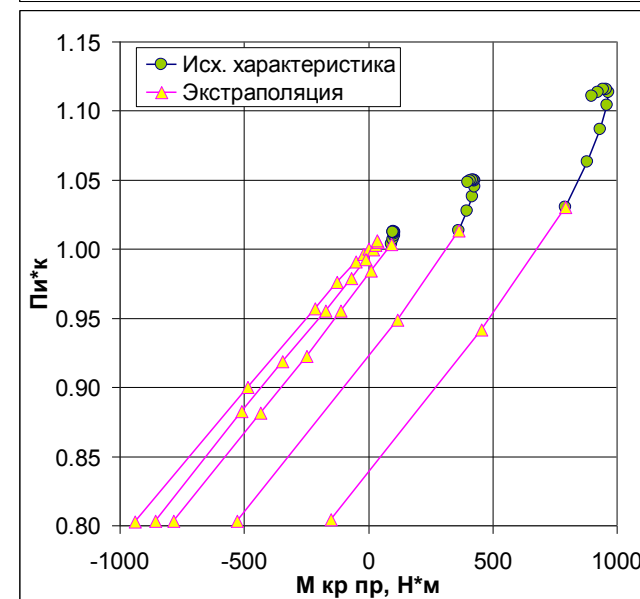
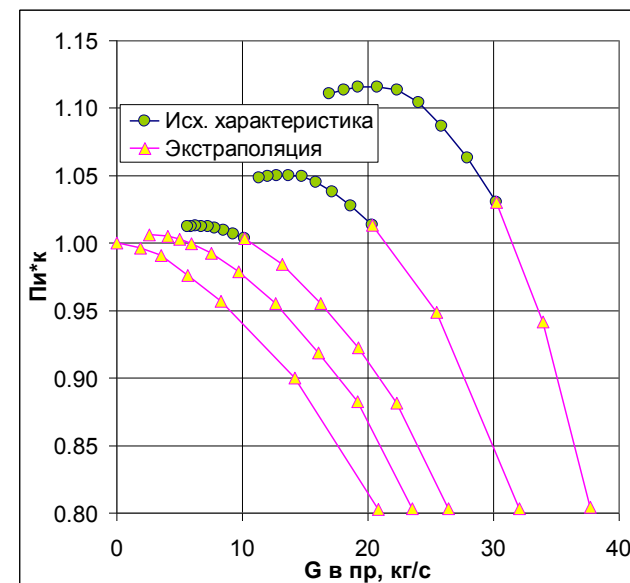
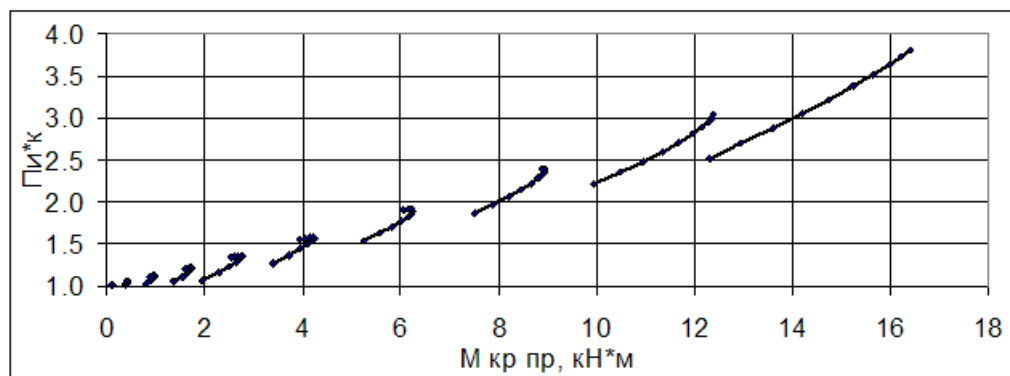
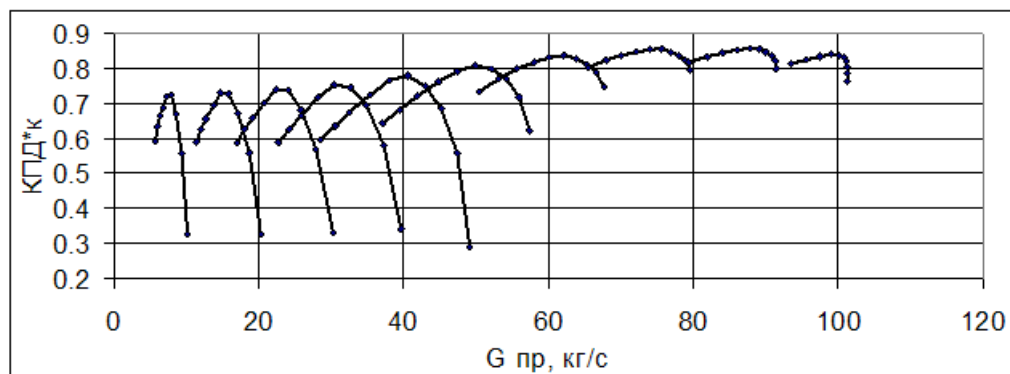
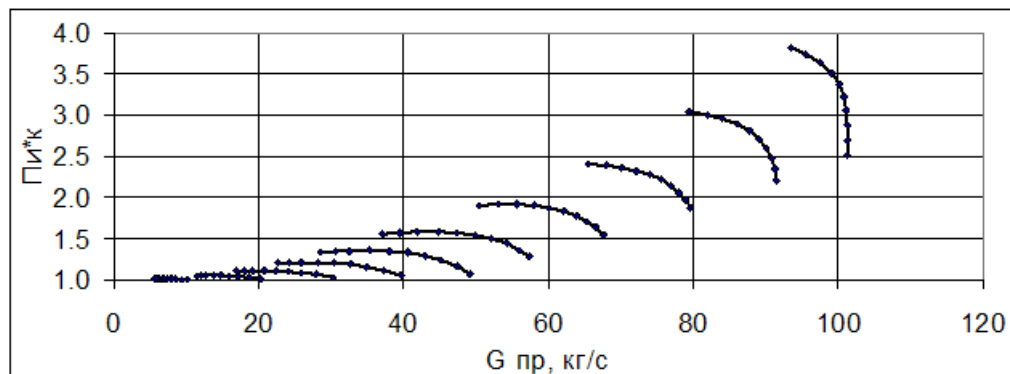
$$M_{кр пр} = M_{кр} \cdot \frac{101325}{P_B^*}$$

$$M_{кр} = \frac{N_K}{\omega}$$

$$N_K = L_K \cdot G_B$$

$$M_{кр пр} = \frac{L_K}{T_B^*} \cdot \frac{G_{B пр}}{n_{пр}} \cdot 2751.63$$

# Моделирование пусковых и авторотационных режимов – проблемы и пути решения



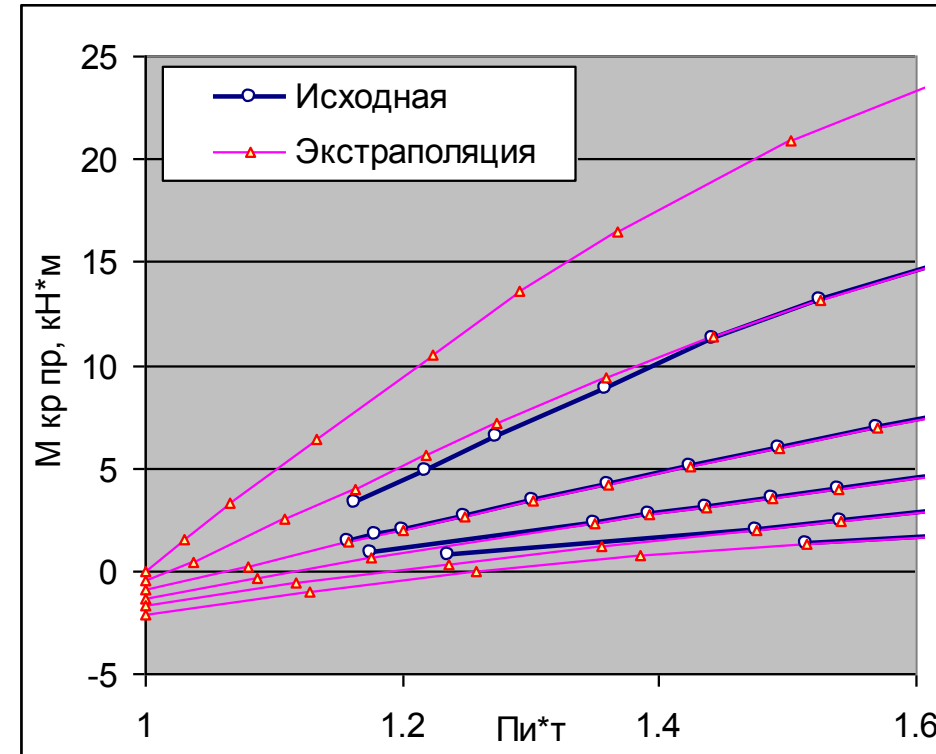
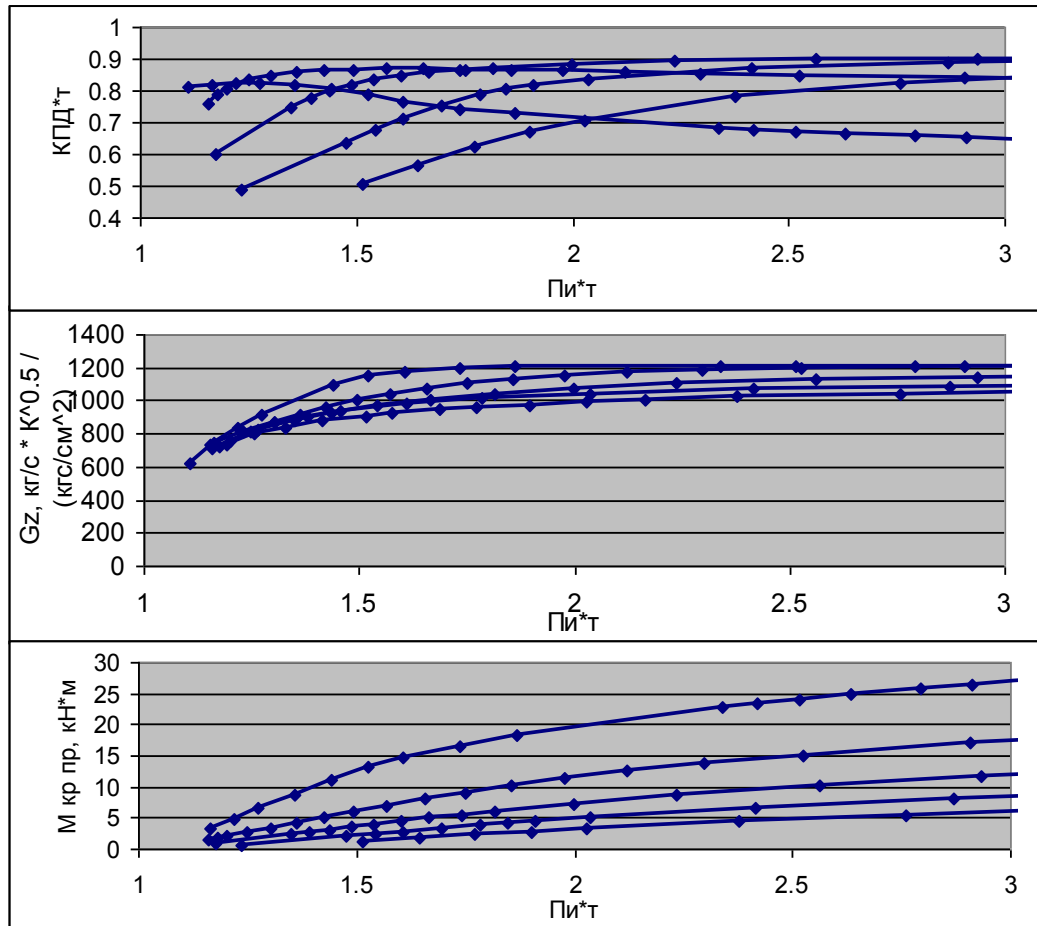
# Моделирование пусковых и авторотационных режимов – проблемы и пути решения

$$\eta_T^* = \frac{L_T}{L_{T\text{ Ад}}^*}$$

$$G_Z = G \cdot \frac{\sqrt{T_G^*}}{p_G^*}$$

$$M_{кр\text{ пр}} = M_{кр} \cdot \frac{101325}{p_G^*} = \frac{L_T}{T_G^*} \cdot \frac{G_Z}{n} \cdot 9.8666 \cdot \sqrt{T_G^*}$$

$$\frac{L_T}{T_G^*} = c_P \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{k-1}{k}}}\right) \cdot \eta_T^*$$



# Моделирование пусковых и авторотационных режимов



## Ввод характеристик компрессоров и турбин для обеспечения возможности расчета пусковых и авторотационных режимов

**Свойства вентилятора двухконтурного : наружный контур**

Полное и сокращенное название компрессора, комментарии

Блок ввода характеристики компрессора из текстового файла

Ротор компрессора:

100% физической частоты вращения соответствуют  об/мин

Наличие характеристики с расхождением по углам направляющих аппаратов

- ☒ Нет расхождения по углам НА компрессора
- ☐ Есть расхождение по углам НА компрессора

Параметры настройки интерполяции характеристик

В файле характеристик приведенная частота вращения задана

- ☒ В относительном виде (1.0 соответствует 100%)
- ☐ В абсолютном виде (об/мин)

Температура, к которой приведены частоты вращения в характеристиках из файла, К (часто это расч. T\* на вх. в компр.)

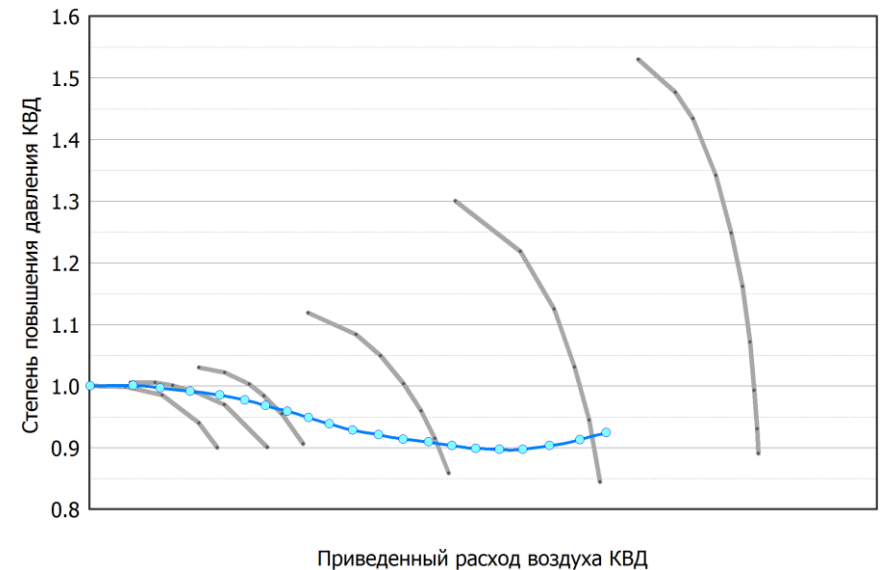
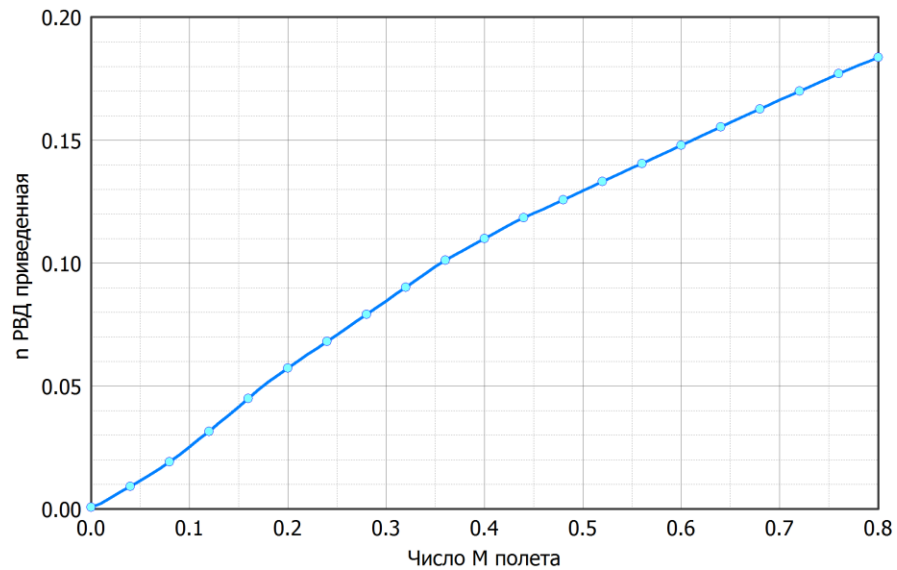
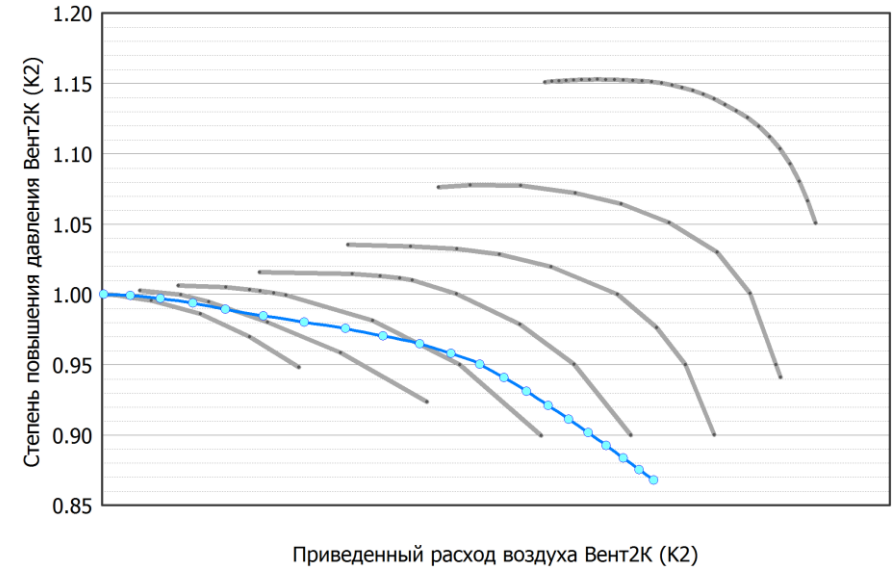
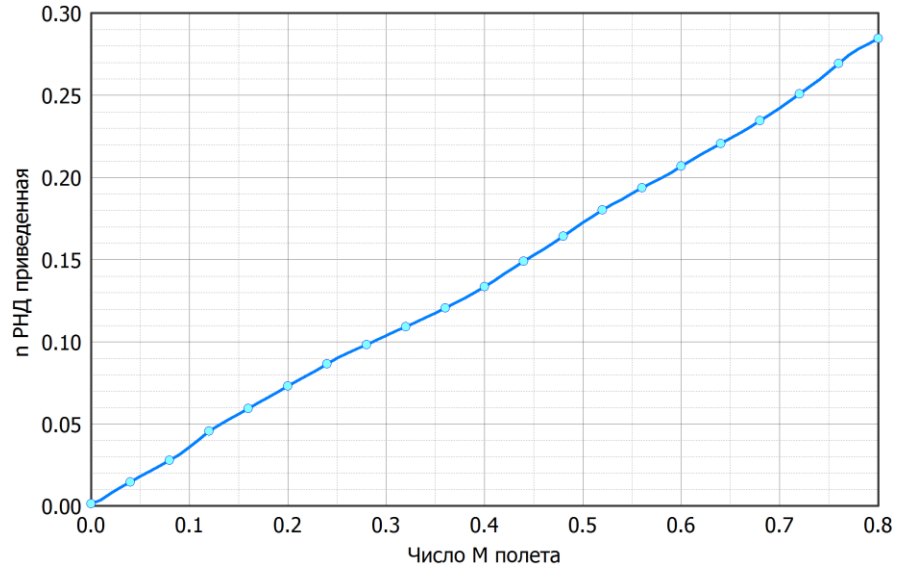
Температура на входе в компрессор, к которой в расчетах будем приводить физ. частоту вращения, К (обычно это 288.15 К)

Имя файла с характеристиками компрессора:  
CFM56-7B2, P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107, P108, P109, P110, P111, P112, P113, P114, P115, P116, P117, P118, P119, P120, P121, P122, P123, P124, P125, P126, P127, P128, P129, P130, P131, P132, P133, P134, P135, P136, P137, P138, P139, P140, P141, P142, P143, P144, P145, P146, P147, P148, P149, P150, P151, P152, P153, P154, P155, P156, P157, P158, P159, P160, P161, P162, P163, P164, P165, P166, P167, P168, P169, P170, P171, P172, P173, P174, P175, P176, P177, P178, P179, P180, P181, P182, P183, P184, P185, P186, P187, P188, P189, P190, P191, P192, P193, P194, P195, P196, P197, P198, P199, P200, P201, P202, P203, P204, P205, P206, P207, P208, P209, P210, P211, P212, P213, P214, P215, P216, P217, P218, P219, P220, P221, P222, P223, P224, P225, P226, P227, P228, P229, P230, P231, P232, P233, P234, P235, P236, P237, P238, P239, P240, P241, P242, P243, P244, P245, P246, P247, P248, P249, P250, P251, P252, P253, P254, P255, P256, P257, P258, P259, P260, P261, P262, P263, P264, P265, P266, P267, P268, P269, P270, P271, P272, P273, P274, P275, P276, P277, P278, P279, P280, P281, P282, P283, P284, P285, P286, P287, P288, P289, P290, P291, P292, P293, P294, P295, P296, P297, P298, P299, P300, P301, P302, P303, P304, P305, P306, P307, P308, P309, P310, P311, P312, P313, P314, P315, P316, P317, P318, P319, P320, P321, P322, P323, P324, P325, P326, P327, P328, P329, P330, P331, P332, P333, P334, P335, P336, P337, P338, P339, P340, P341, P342, P343, P344, P345, P346, P347, P348, P349, P350, P351, P352, P353, P354, P355, P356, P357, P358, P359, P360, P361, P362, P363, P364, P365, P366, P367, P368, P369, P370, P371, P372, P373, P374, P375, P376, P377, P378, P379, P380, P381, P382, P383, P384, P385, P386, P387, P388, P389, P390, P391, P392, P393, P394, P395, P396, P397, P398, P399, P400, P401, P402, P403, P404, P405, P406, P407, P408, P409, P410, P411, P412, P413, P414, P415, P416, P417, P418, P419, P420, P421, P422, P423, P424, P425, P426, P427, P428, P429, P430, P431, P432, P433, P434, P435, P436, P437, P438, P439, P440, P441, P442, P443, P444, P445, P446, P447, P448, P449, P450, P451, P452, P453, P454, P455, P456, P457, P458, P459, P460, P461, P462, P463, P464, P465, P466, P467, P468, P469, P470, P471, P472, P473, P474, P475, P476, P477, P478, P479, P480, P481, P482, P483, P484, P485, P486, P487, P488, P489, P490, P491, P492, P493, P494, P495, P496, P497, P498, P499, P500, P501, P502, P503, P504, P505, P506, P507, P508, P509, P510, P511, P512, P513, P514, P515, P516, P517, P518, P519, P520, P521, P522, P523, P524, P525, P526, P527, P528, P529, P530, P531, P532, P533, P534, P535, P536, P537, P538, P539, P540, P541, P542, P543, P544, P545, P546, P547, P548, P549, P550, P551, P552, P553, P554, P555, P556, P557, P558, P559, P560, P561, P562, P563, P564, P565, P566, P567, P568, P569, P570, P571, P572, P573, P574, P575, P576, P577, P578, P579, P580, P581, P582, P583, P584, P585, P586, P587, P588, P589, P590, P591, P592, P593, P594, P595, P596, P597, P598, P599, P600, P601, P602, P603, P604, P605, P606, P607, P608, P609, P610, P611, P612, P613, P614, P615, P616, P617, P618, P619, P620, P621, P622, P623, P624, P625, P626, P627, P628, P629, P630, P631, P632, P633, P634, P635, P636, P637, P638, P639, P640, P641, P642, P643, P644, P645, P646, P647, P648, P649, P650, P651, P652, P653, P654, P655, P656, P657, P658, P659, P660, P661, P662, P663, P664, P665, P666, P667, P668, P669, P670, P671, P672, P673, P674, P675, P676, P677, P678, P679, P680, P681, P682, P683, P684, P685, P686, P687, P688, P689, P690, P691, P692, P693, P694, P695, P696, P697, P698, P699, P700, P701, P702, P703, P704, P705, P706, P707, P708, P709, P710, P711, P712, P713, P714, P715, P716, P717, P718, P719, P720, P721, P722, P723, P724, P725, P726, P727, P728, P729, P730, P731, P732, P733, P734, P735, P736, P737, P738, P739, P740, P741, P742, P743, P744, P745, P746, P747, P748, P749, P750, P751, P752, P753, P754, P755, P756, P757, P758, P759, P760, P761, P762, P763, P764, P765, P766, P767, P768, P769, P770, P771, P772, P773, P774, P775, P776, P777, P778, P779, P780, P781, P782, P783, P784, P785, P786, P787, P788, P789, P790, P791, P792, P793, P794, P795, P796, P797, P798, P799, P800, P801, P802, P803, P804, P805, P806, P807, P808, P809, P810, P811, P812, P813, P814, P815, P816, P817, P818, P819, P820, P821, P822, P823, P824, P825, P826, P827, P828, P829, P830, P831, P832, P833, P834, P835, P836, P837, P838, P839, P840, P841, P842, P843, P844, P845, P846, P847, P848, P849, P850, P851, P852, P853, P854, P855, P856, P857, P858, P859, P860, P861, P862, P863, P864, P865, P866, P867, P868, P869, P870, P871, P872, P873, P874, P875, P876, P877, P878, P879, P880, P881, P882, P883, P884, P885, P886, P887, P888, P889, P890, P891, P892, P893, P894, P895, P896, P897, P898, P899, P900, P901, P902, P903, P904, P905, P906, P907, P908, P909, P910, P911, P912, P913, P914, P915, P916, P917, P918, P919, P920, P921, P922, P923, P924, P925, P926, P927, P928, P929, P930, P931, P932, P933, P934, P935, P936, P937, P938, P939, P940, P941, P942, P943, P944, P945, P946, P947, P948, P949, P950, P951, P952, P953, P954, P955, P956, P957, P958, P959, P960, P961, P962, P963, P964, P965, P966, P967, P968, P969, P970, P971, P972, P973, P974, P975, P976, P977, P978, P979, P980, P981, P982, P983, P984, P985, P986, P987, P988, P989, P990, P991, P992, P993, P994, P995, P996, P997, P998, P999, P1000, P1001, P1002, P1003, P1004, P1005, P1006, P1007, P1008, P1009, P1010, P1011, P1012, P1013, P1014, P1015, P1016, P1017, P1018, P1019, P1020, P1021, P1022, P1023, P1024, P1025, P1026, P1027, P1028, P1029, P1030, P1031, P1032, P1033, P1034, P1035, P1036, P1037, P1038, P1039, P1040, P1041, P1042, P1043, P1044, P1045, P1046, P1047, P1048, P1049, P1050, P1051, P1052, P1053, P1054, P1055, P1056, P1057, P1058, P1059, P1060, P1061, P1062, P1063, P1064, P1065, P1066, P1067, P1068, P1069, P1070, P1071, P1072, P1073, P1074, P1075, P1076, P1077, P1078, P1079, P1080, P1081, P1082, P1083, P1084, P1085, P1086, P1087, P1088, P1089, P1090, P1091, P1092, P1093, P1094, P1095, P1096, P1097, P1098, P1099, P1100, P1101, P1102, P1103, P1104, P1105, P1106, P1107, P1108, P1109, P1110, P1111, P1112, P1113, P1114, P1115, P1116, P1117, P1118, P1119, P1120, P1121, P1122, P1123, P1124, P1125, P1126, P1127, P1128, P1129, P1130, P1131, P1132, P1133, P1134, P1135, P1136, P1137, P1138, P1139, P1140, P1141, P1142, P1143, P1144, P1145, P1146, P1147, P1148, P1149, P1150, P1151, P1152, P1153, P1154, P1155, P1156, P1157, P1158, P1159, P1160, P1161, P1162, P1163, P1164, P1165, P1166, P1167, P1168, P1169, P1170, P1171, P1172, P1173, P1174, P1175, P1176, P1177, P1178, P1179, P1180, P1181, P1182, P1183, P1184, P1185, P1186, P1187, P1188, P1189, P1190, P1191, P1192, P1193, P1194, P1195, P1196, P1197, P1198, P1199, P1200, P1201, P1202, P1203, P1204, P1205, P1206, P1207, P1208, P1209, P1210, P1211, P1212, P1213, P1214, P1215, P1216, P1217, P1218, P1219, P1220, P1221, P1222, P1223, P1224, P1225, P1226, P1227, P1228, P1229, P1230, P1231, P1232, P1233, P1234, P1235, P1236, P1237, P1238, P1239, P1240, P1241, P1242, P1243, P1244, P1245, P1246, P1247, P1248, P1249, P1250, P1251, P1252, P1253, P1254, P1255, P1256, P1257, P1258, P1259, P1260, P1261, P1262, P1263, P1264, P1265, P1266, P1267, P1268, P1269, P1270, P1271, P1272, P1273, P1274, P1275, P1276, P1277, P1278, P1279, P1280, P1281, P1282, P1283, P1284, P1285, P1286, P1287, P1288, P1289, P1290, P1291, P1292, P1293, P1294, P1295, P1296, P1297, P1298, P1299, P1300, P1301, P1302, P1303, P1304, P1305, P1306, P1307, P1308, P1309, P1310, P1311, P1312, P1313, P1314, P1315, P1316, P1317, P1318, P1319, P1320, P1321, P1322, P1323, P1324, P1325, P1326, P1327, P1328, P1329, P1330, P1331, P1332, P1333, P1334, P1335, P1336, P1337, P1338, P1339, P1340, P1341, P1342, P1343, P1344, P1345, P1346, P1347, P1348, P1349, P1350, P1351, P1352, P1353, P1354, P1355, P1356, P1357, P1358, P1359, P1360, P1361, P1362, P1363, P1364, P1365, P1366, P1367, P1368, P1369, P1370, P1371, P1372, P1373, P1374, P1375, P1376, P1377, P1378, P1379, P1380, P1381, P1382, P1383, P1384, P1385, P1386, P1387, P1388, P1389, P1390, P1391, P1392, P1393, P1394, P1395, P1396, P1397, P1398, P1399, P1400, P1401, P1402, P1403, P1404, P1405, P1406, P1407, P1408, P1409, P1410, P1411, P1412, P1413, P1414, P1415, P1416, P1417, P1418, P1419, P1420, P1421, P1422, P1423, P1424, P1425, P1426, P1427, P1428, P1429, P1430, P1431, P1432, P1433, P1434, P1435, P1436, P1437, P1438, P1439, P1440, P1441, P1442, P1443, P1444, P1445, P1446, P1447, P1448, P1449, P1450, P1451, P1452, P1453, P1454, P1455, P1456, P1457, P1458, P1459, P1460, P1461, P1462, P1463, P1464, P1465, P1466, P1467, P1468, P1469, P1470, P1471, P1472, P1473, P1474, P1475, P1476, P1477, P1478, P1479, P1480, P1481, P1482, P1483, P1484, P1485, P1486, P1487, P1488, P1489, P1490, P1491, P1492, P1493, P1494, P1495, P1496, P1497, P1498, P1499, P1500, P1501, P1502, P1503, P1504, P1505, P1506, P1507, P1508, P1509, P1510, P1511, P1512, P1513, P1514, P1515, P1516, P1517, P1518, P1519, P1520, P1521, P1522, P1523, P1524, P1525, P1526, P1527, P1528, P1529, P1530, P1531, P1532, P1533, P1534, P1535, P1536, P1537, P1538, P1539, P1540, P1541, P1542, P1543, P1544, P1545, P1546, P1547, P1548, P1549, P1550, P1551, P1552, P1553, P1554, P1555, P1556, P1557, P1558, P1559, P1560, P1561, P1562, P1563, P1564, P1565, P1566, P1567, P1568, P1569, P1570, P1571, P1572, P1573, P1574, P1575, P1576, P1577, P1578, P1579, P1580, P1581, P1582, P1583, P1584, P1585, P1586, P1587, P1588, P1589, P1590, P1591, P1592, P1593, P1594, P1595, P1596, P1597, P1598, P1599, P1600, P1601, P1602, P1603, P1604, P1605, P1606, P1607, P1608, P1609, P1610, P1611, P1612, P1613, P1614, P1615, P1616, P1617, P1618, P1619, P1620, P1621, P1622, P1623, P1624, P1625, P1626, P1627, P1628, P1629, P1630, P1631, P1632, P1633, P1634, P1635, P1636, P1637, P1638, P1639, P1640, P1641, P1642, P1643, P1644, P1645, P1646, P1647, P1648, P1649, P1650, P1651, P1652, P1653, P1654, P1655, P1656, P1657, P1658, P1659, P1660, P1661, P1662, P1663, P1664, P1665, P1666, P1667, P1668, P1669, P1670, P1671, P1672, P1673, P1674, P1675, P1676, P1677, P1678, P1679, P1680, P1681, P1682, P1683, P1684, P1685, P1686, P1687, P1688, P1689, P1690, P1691, P1692, P1693, P1694, P1695, P1696, P1697, P1698, P1699, P1700, P1701, P1702, P1703, P1704, P1705, P1706, P1707, P1708, P1709, P1710, P1711, P1712, P1713, P1714, P1715, P1716, P1717, P1718, P1719, P1720, P1721, P1722, P1723, P1724, P1725, P1726, P1727, P1728, P1729, P1730, P1731, P1732, P1733, P1734, P1735, P1736, P1737, P1738, P1739, P1740, P1741, P1742, P1743, P1744, P1745, P1746, P1747, P1748, P1749, P1750, P1751, P1752, P1753, P1754, P1755, P1756, P1757, P1758, P1759, P1760, P1761, P1762, P1763, P1764, P1765, P1766, P1767, P1768, P1769, P1770, P1771, P1772, P1773, P1774, P1775, P1776, P1777, P1778, P1779, P1780, P1781, P1782, P1783, P1784, P1785, P1786, P1787, P1788, P1789, P1790, P1791, P1792, P1793, P1794, P1795, P1796, P1797, P1798, P1799, P1800, P1801, P1802, P1803, P1804, P1805, P1806, P1807, P1808, P1809, P1810, P1811, P1812, P1813, P1814, P1815, P1816, P1817, P1818, P1819, P1820, P1821, P1822, P1823, P1824, P1825, P1826, P1827, P1828, P1829, P1830, P1831, P1832, P1833, P1834, P1835, P1836, P1837, P1838, P1839, P1840, P1841, P1842, P1843, P1844, P1845, P1846, P1847, P1848, P1849, P1850, P1851, P1852, P1853, P1854, P1855, P1856, P1857, P1858, P1859, P1860, P1861, P1862, P1863, P1864, P1865, P1866, P1867, P1868, P1869, P1870, P1871, P1872, P1873, P1874, P1875, P1876, P1877, P1878, P1879, P1880, P1881, P1882, P1883, P1884, P1885, P1886, P1887, P1888, P1889, P1890, P1891, P1892, P1893, P1894, P1895, P1896, P1897, P1898, P1899, P1900, P1901, P1902, P1903, P1904, P1905, P1906, P1907, P1908, P1909, P1910, P1911, P1912, P1913, P1914, P1915, P1916, P1917, P1918, P1919, P1920, P1921, P1922, P1923, P1924, P1925, P1926, P1927, P1928, P1929, P1930, P1931, P1932, P1933, P1934, P1935, P1936, P1937, P1938, P1939, P1940, P1941, P1942, P1943, P1944, P1945, P1946, P1947, P1948, P1949, P1950, P1951, P1952, P1953, P1954, P1955, P1956, P1957, P1958, P1959, P1960, P1961, P1962, P1963, P1964, P1965, P1966, P1967, P1968, P1969, P1970, P1971, P1972, P1973, P1974, P1975, P1976, P1977, P1978, P1979, P1980, P1981, P1982, P1983, P1984, P1985, P1986, P1987, P1988, P1989, P1990, P1991, P1992, P1993, P1994, P1995, P1996, P1997, P1998, P1999, P2000, P2001, P2002, P2003, P2004, P2005, P2006, P2007, P2008, P2009, P2010, P2011, P2012, P2013, P2014, P2015, P2016, P2017, P2018, P2019, P2020, P2021, P2022, P2023, P2024, P2025, P2026, P2027, P2028, P2029, P2030, P2031, P2032, P2033, P2034, P2035, P2036, P2037, P2038, P2039, P2040, P2041, P2042, P2043, P2044, P2045, P2046, P2047, P2048, P2049, P2050, P2051, P2052, P2053, P2054, P2055, P2056, P2057, P2058, P2059, P2060, P2061, P2062, P2063, P2064, P2065, P2066, P2067, P2068, P2069, P2070, P2071, P2072, P2073, P2074, P2075, P2076, P2077, P2078, P2079, P2080, P2081, P2082, P2083, P2084, P2085, P2086, P2087, P2088, P2089, P2090, P2091, P2092, P2093, P2094, P2095, P2096, P2097, P2098, P2099, P2100, P2101, P2102, P2103, P2104, P2105, P2106, P2107, P2108, P2109, P2110, P2111, P2112, P2113, P2114, P2115, P2116, P2117, P2118, P2119, P2120, P2121, P2122, P2123, P2124, P2125, P2126, P2127, P2128, P2129, P2130, P2131, P2132, P2133, P2134, P2135, P2136, P2137, P2138, P2139, P2140, P2141, P2142, P2143, P2144, P2145, P2146, P2147, P2148, P2149, P2150, P2151, P2152, P2153, P2154, P2155, P2156, P2157, P2158, P2159, P2160, P2161, P2162, P2163, P2164, P2165, P2166, P2167, P2168, P2169, P2170, P2171, P2172, P2173, P2174, P2175, P2176, P2177, P2178, P2179, P2180, P2181, P2182, P2183, P2184, P2185, P2186, P2187, P2188, P2189, P2190, P2191, P2192, P2193, P2194, P2195, P2196, P2197, P2198, P2199, P2200, P2201, P2202, P2203, P2204, P2205, P2206, P2207, P2208, P2209, P2210, P2211, P2212, P2213, P2214, P2

# Моделирование пусковых и авторотационных режимов

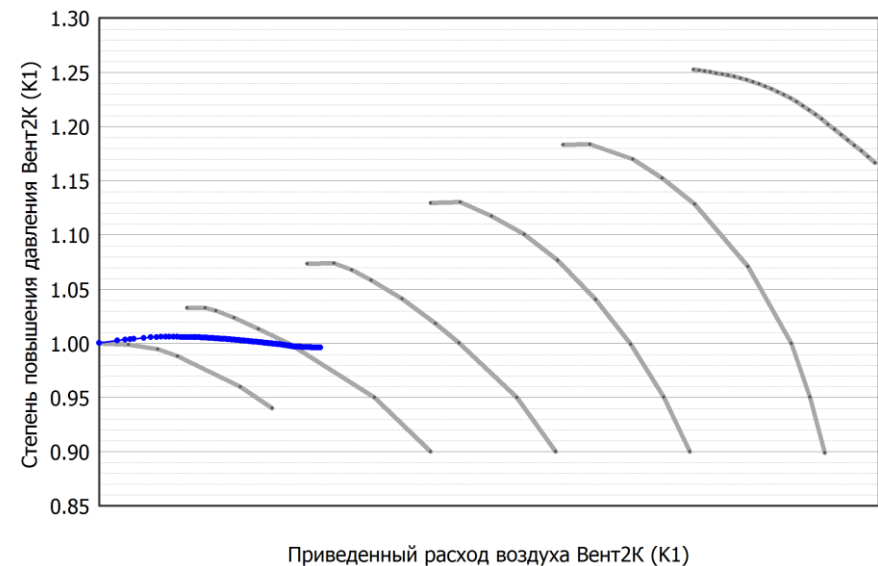
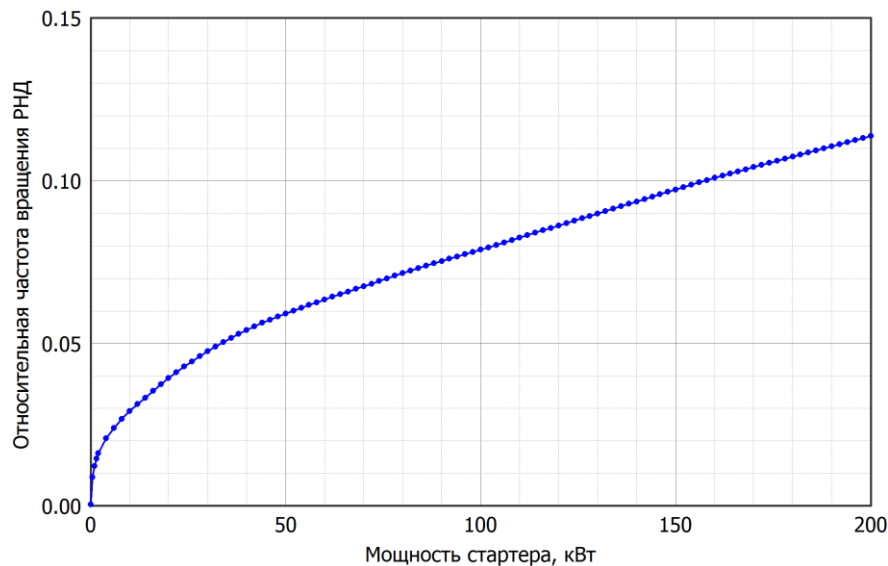
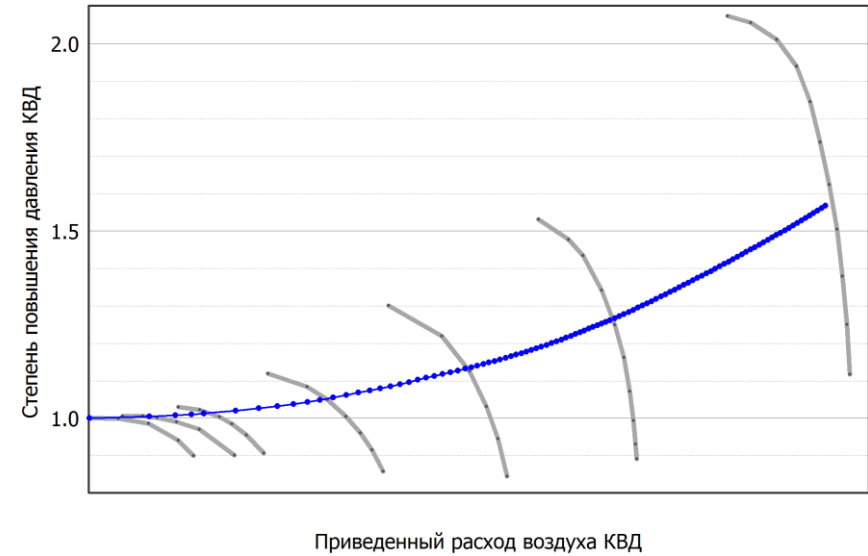
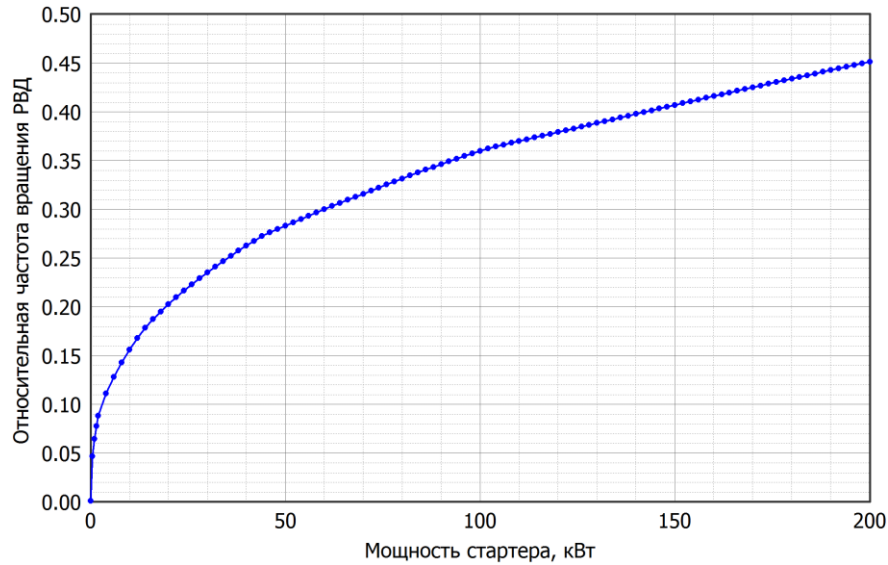


Скоростная характеристика при нулевом расходе топлива (авторотация)



# Моделирование пусковых и авторотационных режимов

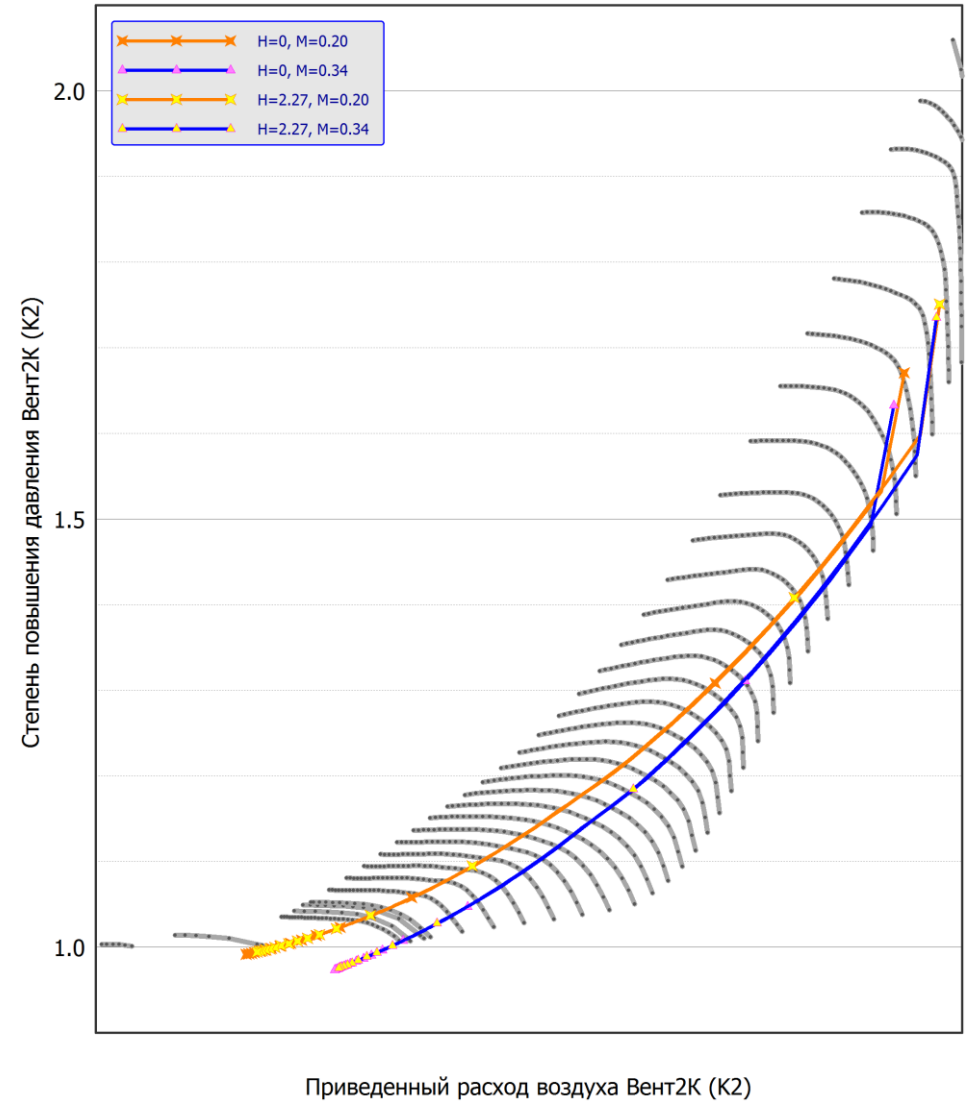
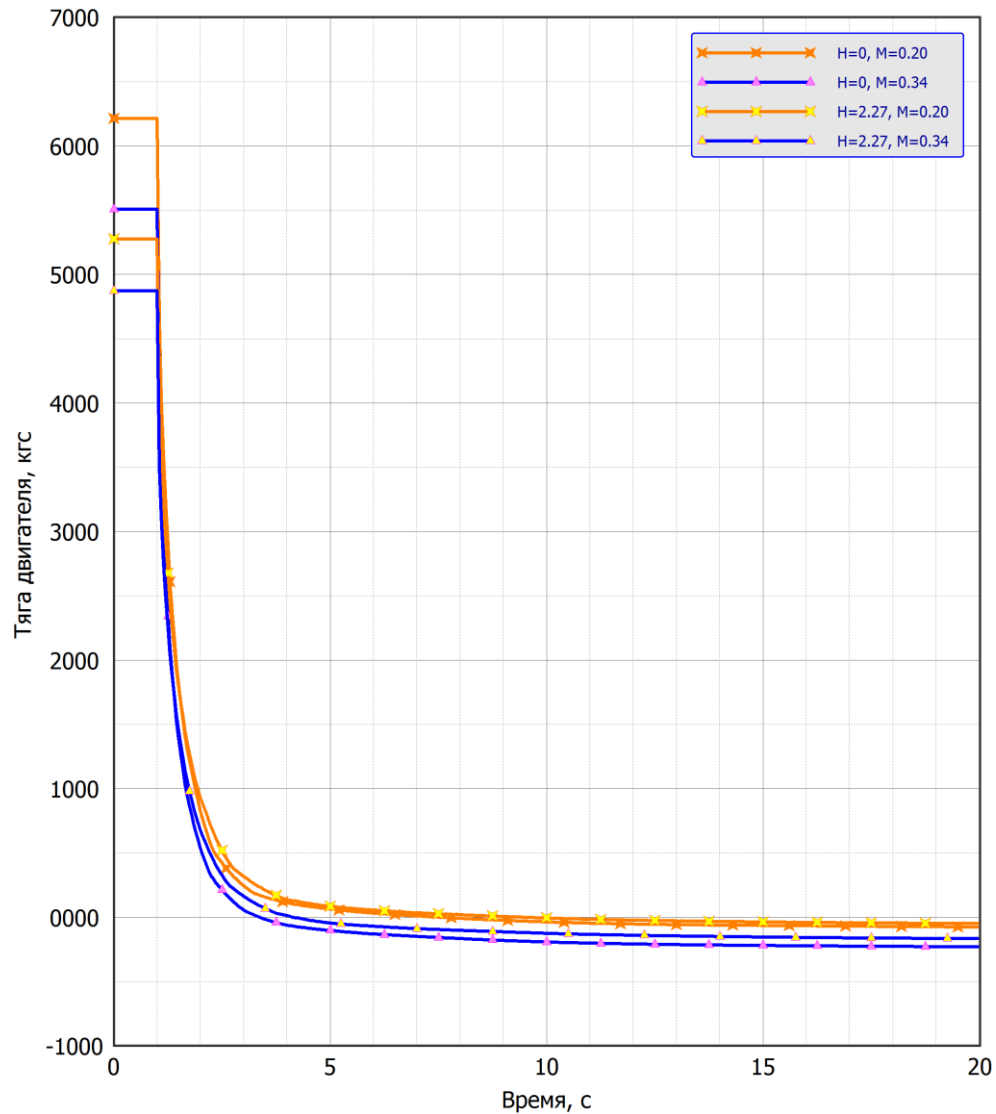
Стартерная характеристика при нулевом расходе топлива



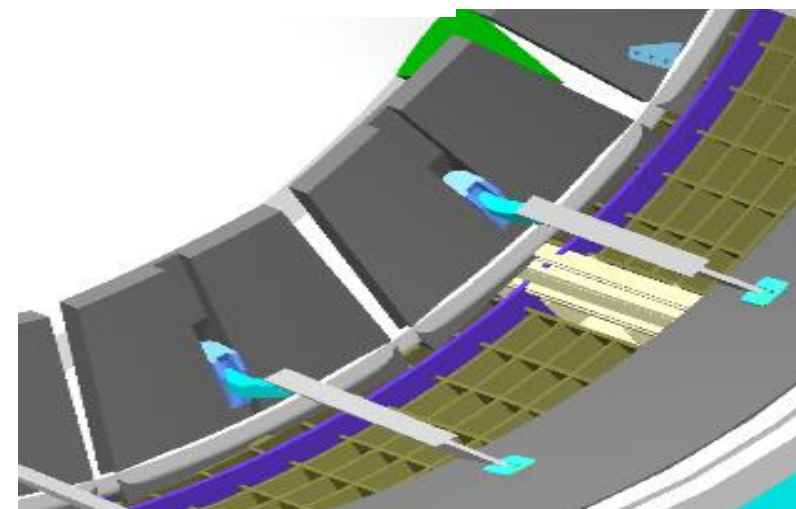
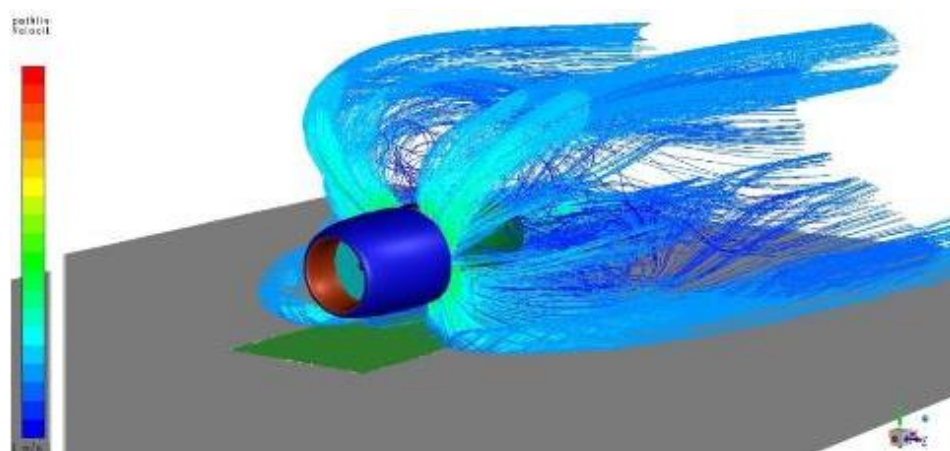
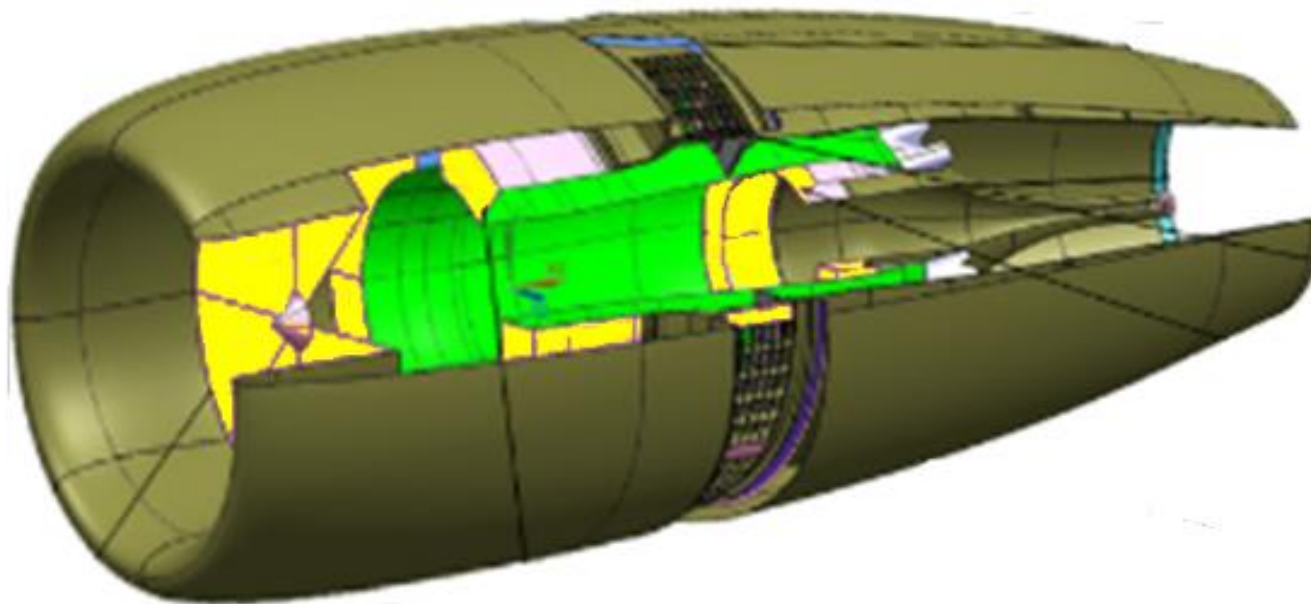
# Моделирование пусковых и авторотационных режимов



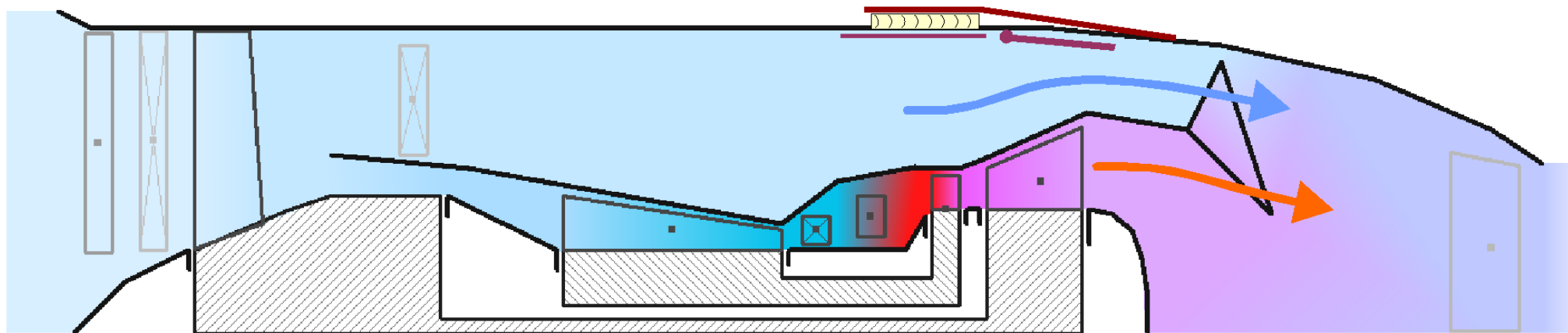
## Динамика изменения параметров при отказе двигателя на взлете



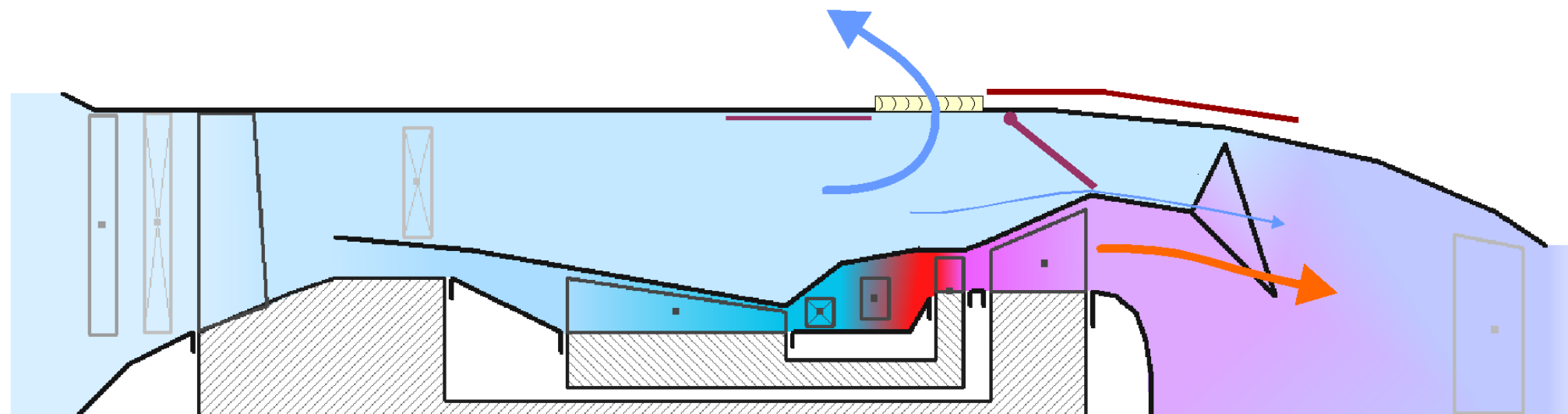




# Принцип реверсирования тяги двигателя

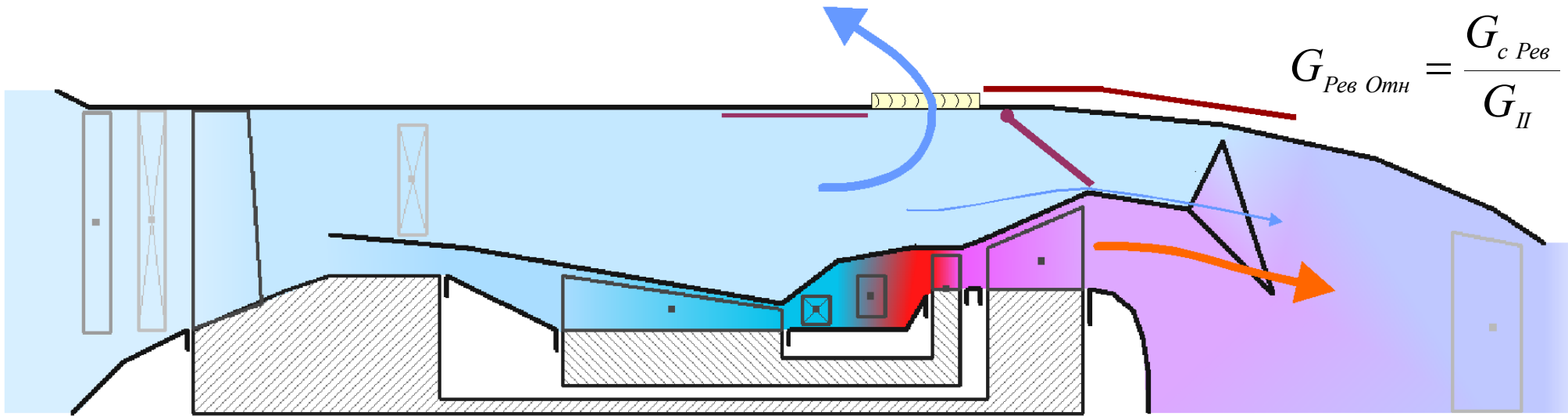
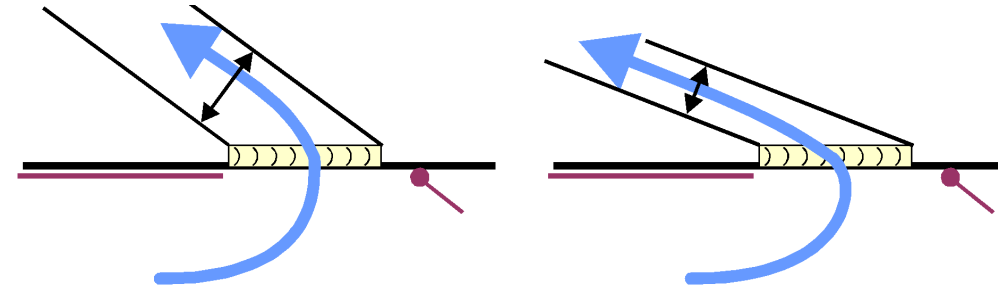
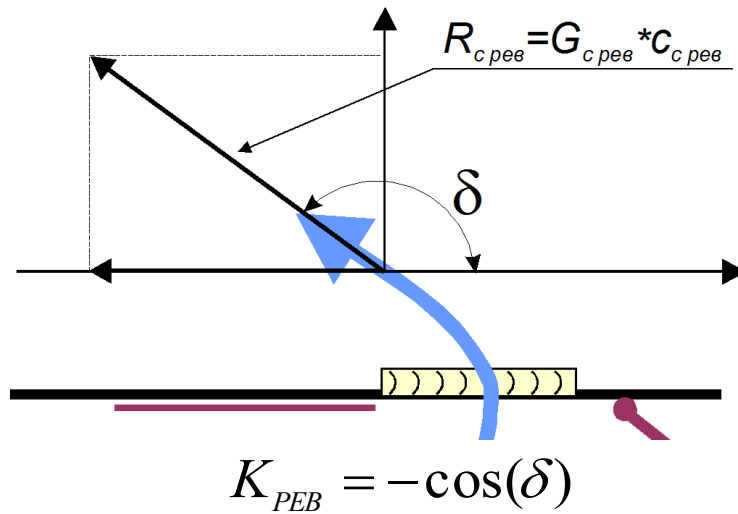


$$R = G_{C\text{ осн}} \cdot c_{C\text{ осн}} - G_B \cdot V_{\text{Пол}}$$



$$R_{\text{РЕВ}} = G_{C\text{ осн}} \cdot c_{C\text{ осн}} - G_B \cdot V_{\text{Пол}} - K_{\text{РЕВ}} \cdot G_{C\text{ РЕВ}} \cdot c_{C\text{ РЕВ}}$$

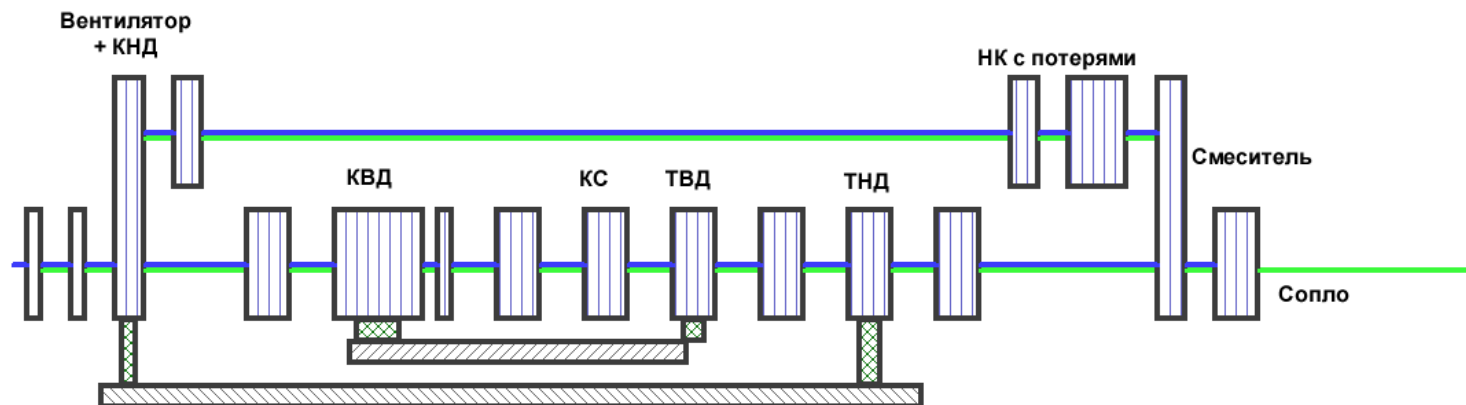
# Проектирование устройства реверса тяги



$$R_{PEB} = G_{C\text{ осн}} \cdot c_{C\text{ осн}} - G_B \cdot V_{\text{Пол}} - K_{PEB} \cdot G_{C\text{ РЕВ}} \cdot c_{C\text{ РЕВ}}$$

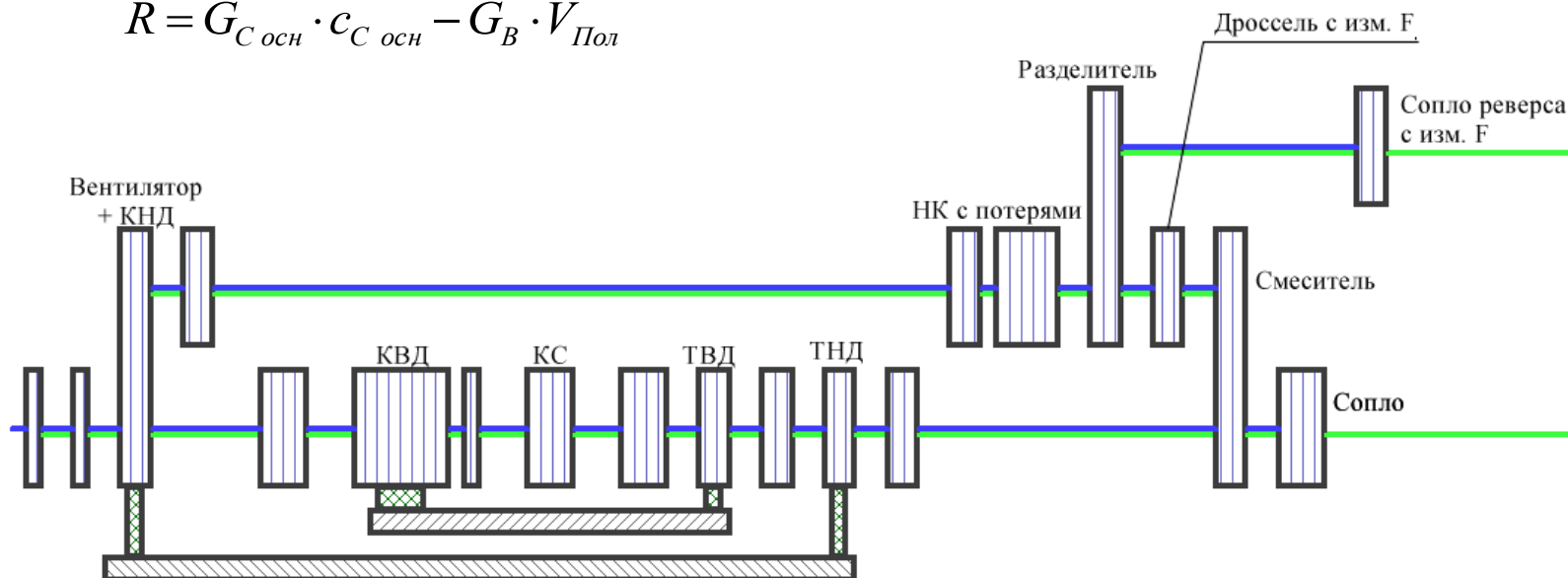
# Термодинамическая ММ ТРДД с реверсивным устройством

Схема  
расчета ТРДД  
без РУ



$$R = G_{C_{осн}} \cdot c_{C_{осн}} - G_B \cdot V_{Пол}$$

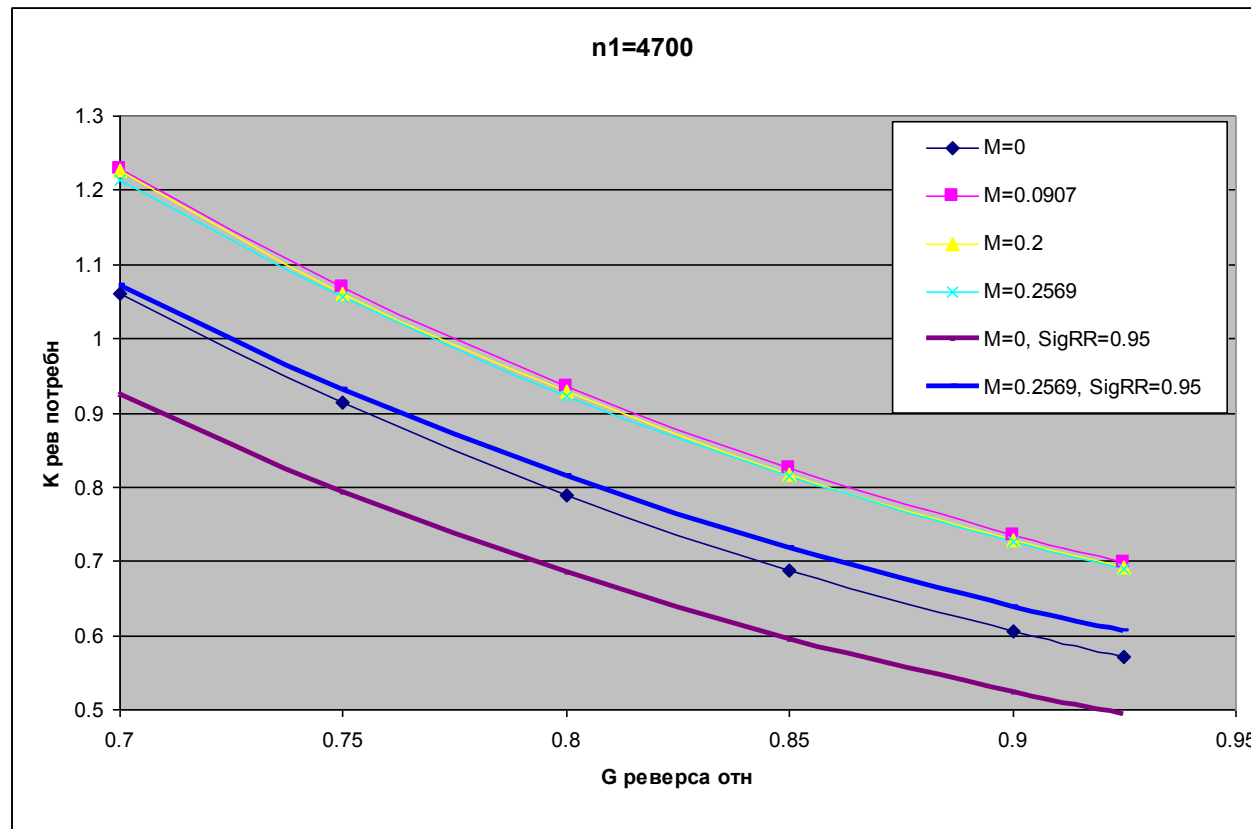
Схема  
расчета  
ТРДД с РУ



$$R_{PEB} = G_{C_{осн}} \cdot c_{C_{осн}} - G_B \cdot V_{Пол} - K_{PEB} \cdot G_{C_{PEB}} \cdot c_{C_{PEB}}$$

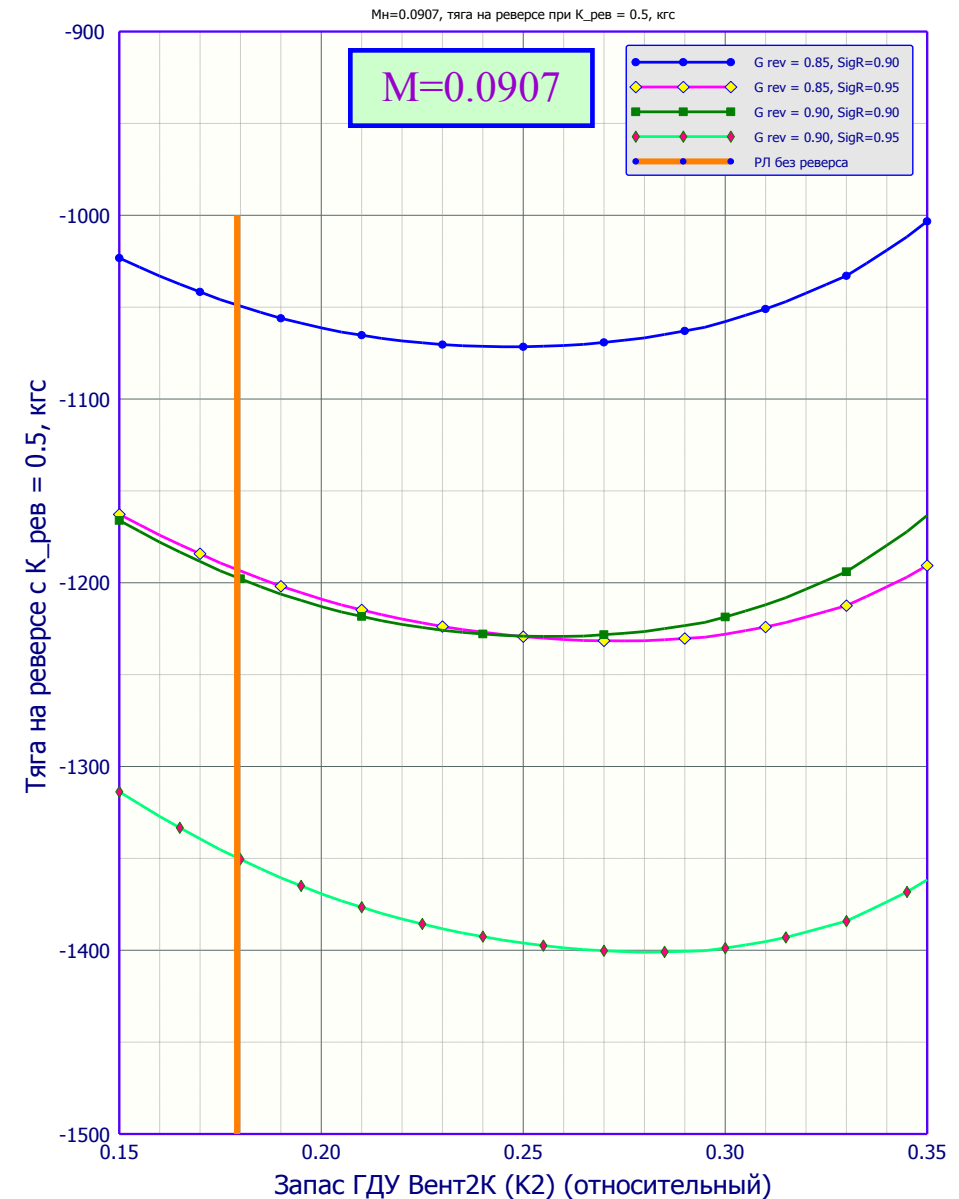
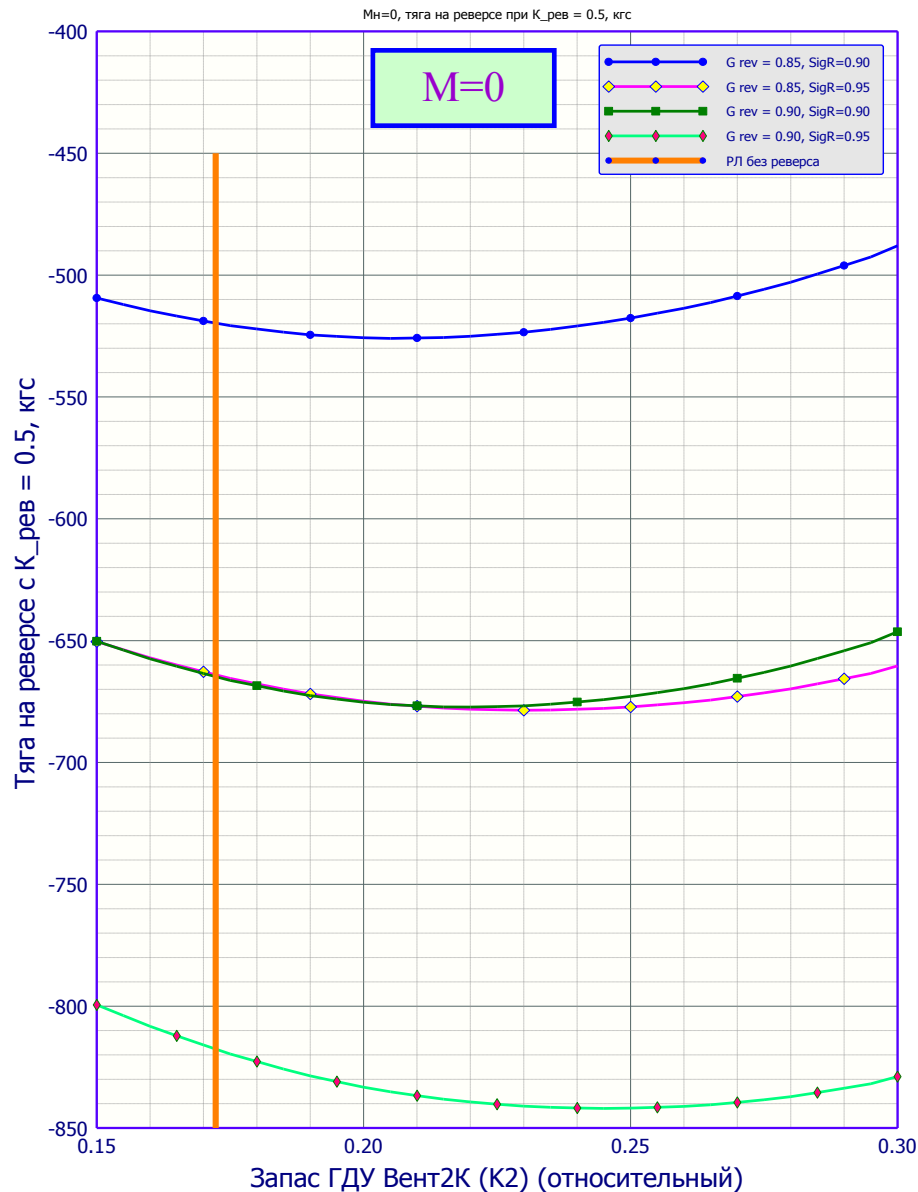
# Результаты оптимизации параметров двигателя на режиме реверса тяги

$$R_{PEB} = G_{C\text{ осн}} \cdot c_{C\text{ осн}} - G_B \cdot V_{Пол} - K_{PEB} \cdot G_{C\text{ PEB}} \cdot c_{C\text{ PEB}}$$

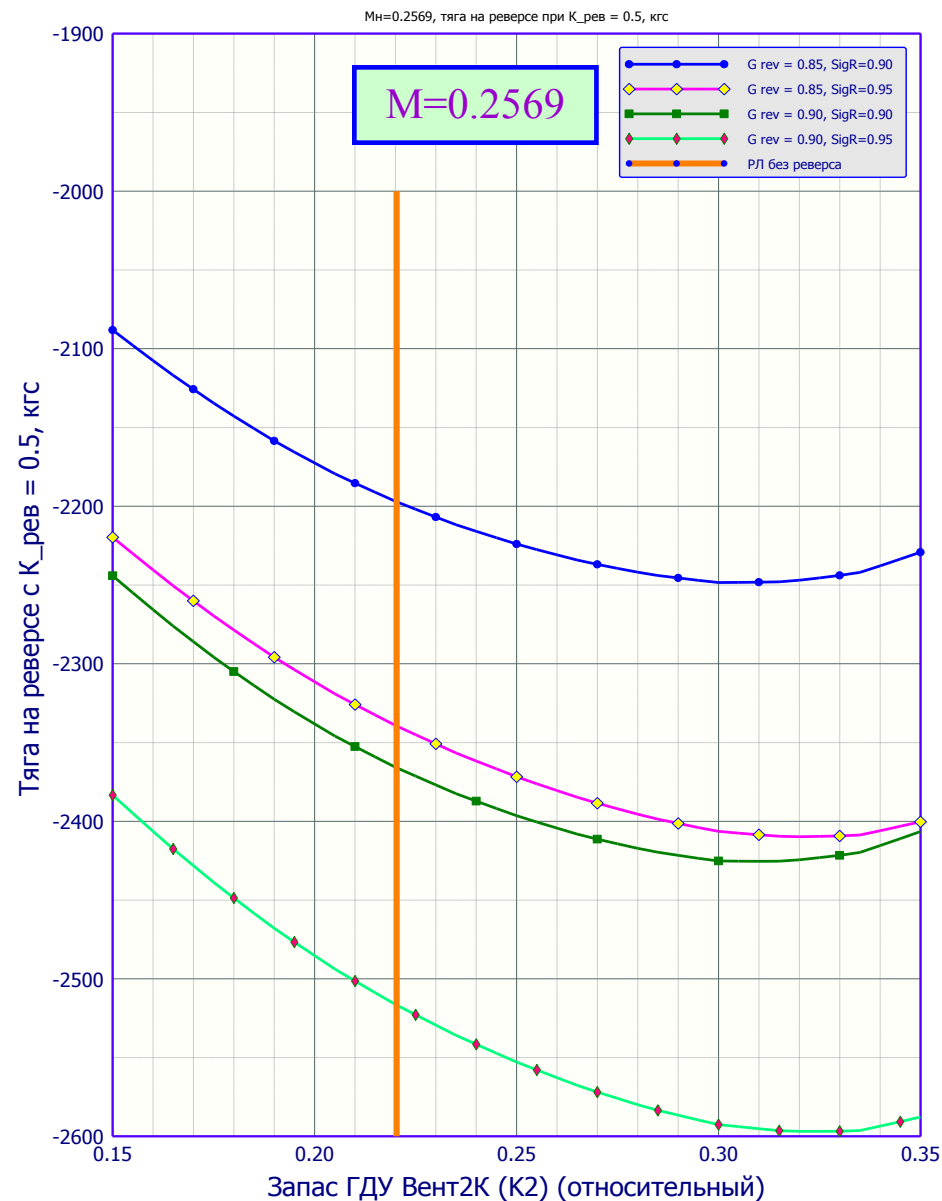
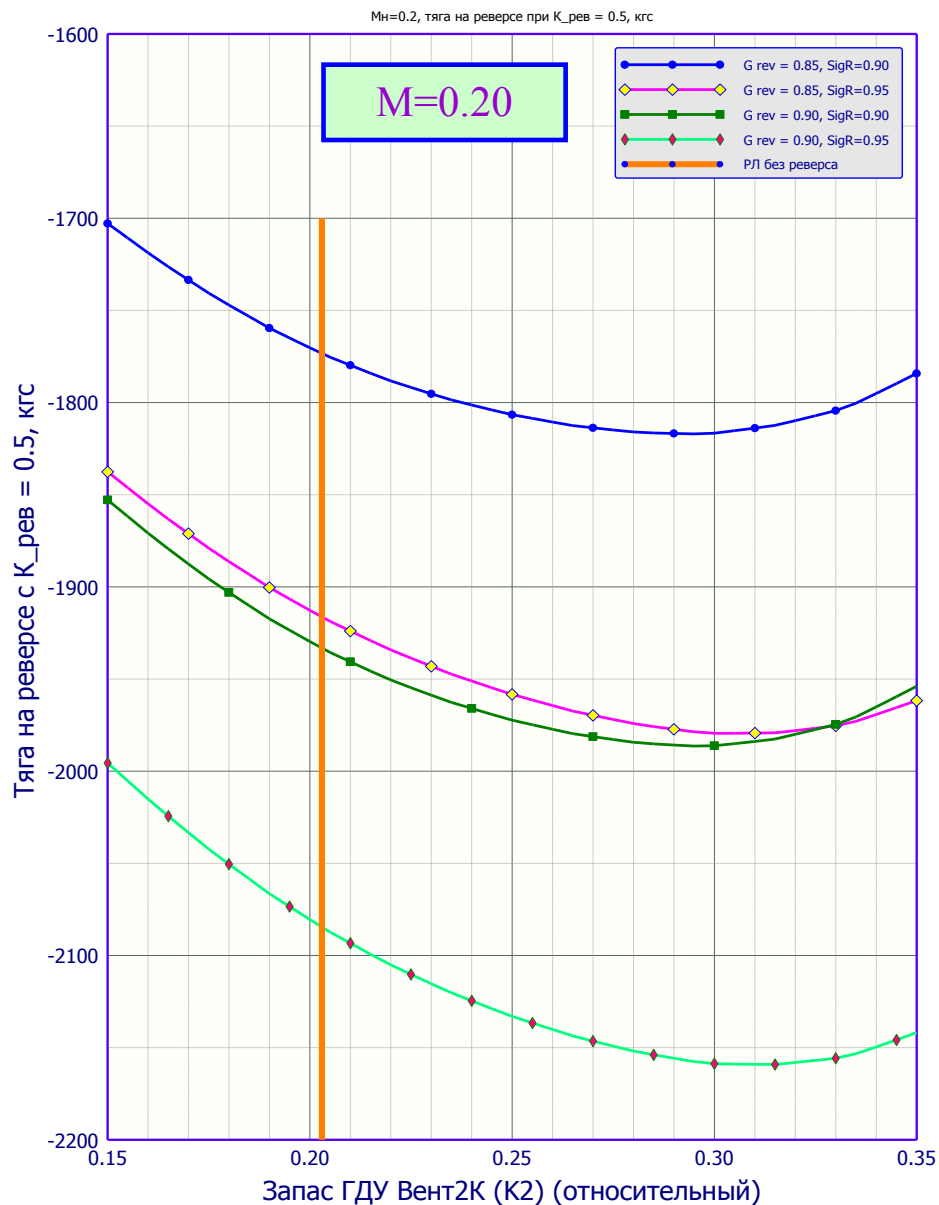


$$G_{Pев Отн} = \frac{G_{с Pев}}{G_{II}}$$

# Влияние положения рабочей точки вентилятора на тягу двигателя на режиме реверса тяги

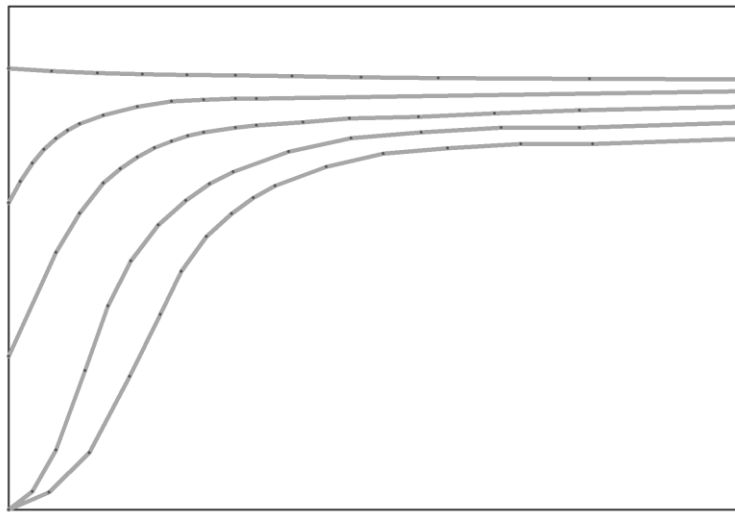


# Влияние положения рабочей точки вентилятора на тягу двигателя на режиме реверса тяги



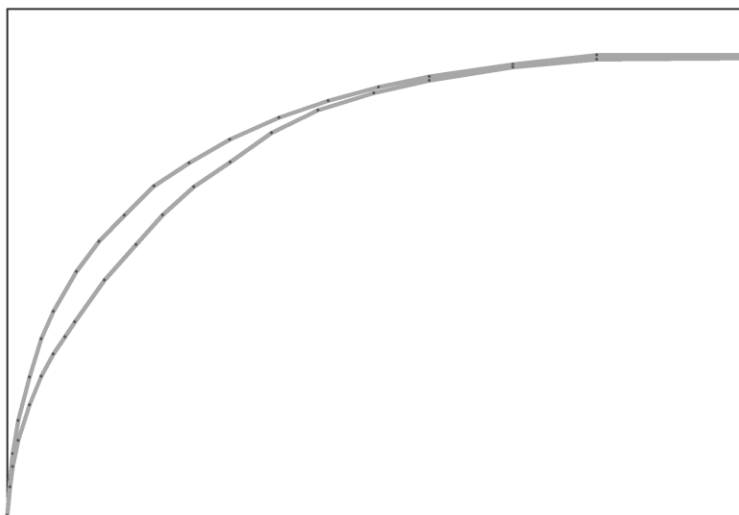
# Характеристики узлов системы реверса тяги для термодинамической модели

Косинус угла поворота потока решеткой реверса



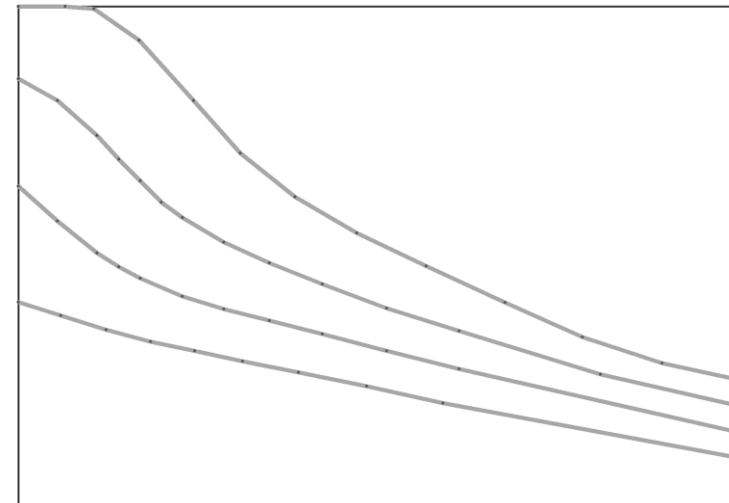
Пи сопла реверса располагаемое ( $P^*_{кр}/P_n$ )

Приведенный расход под заслонкой реверса по характеристике, кг/с



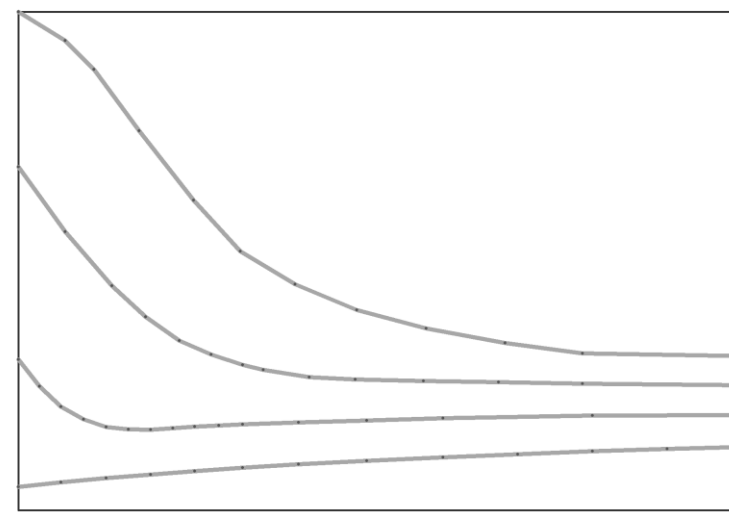
Отношение полных давлений на входе в заслонку реверса к давлению на выходе

Коэффициент скорости эквивалентного решетке сопла



Пи сопла реверса располагаемое ( $P^*_{кр}/P_n$ )

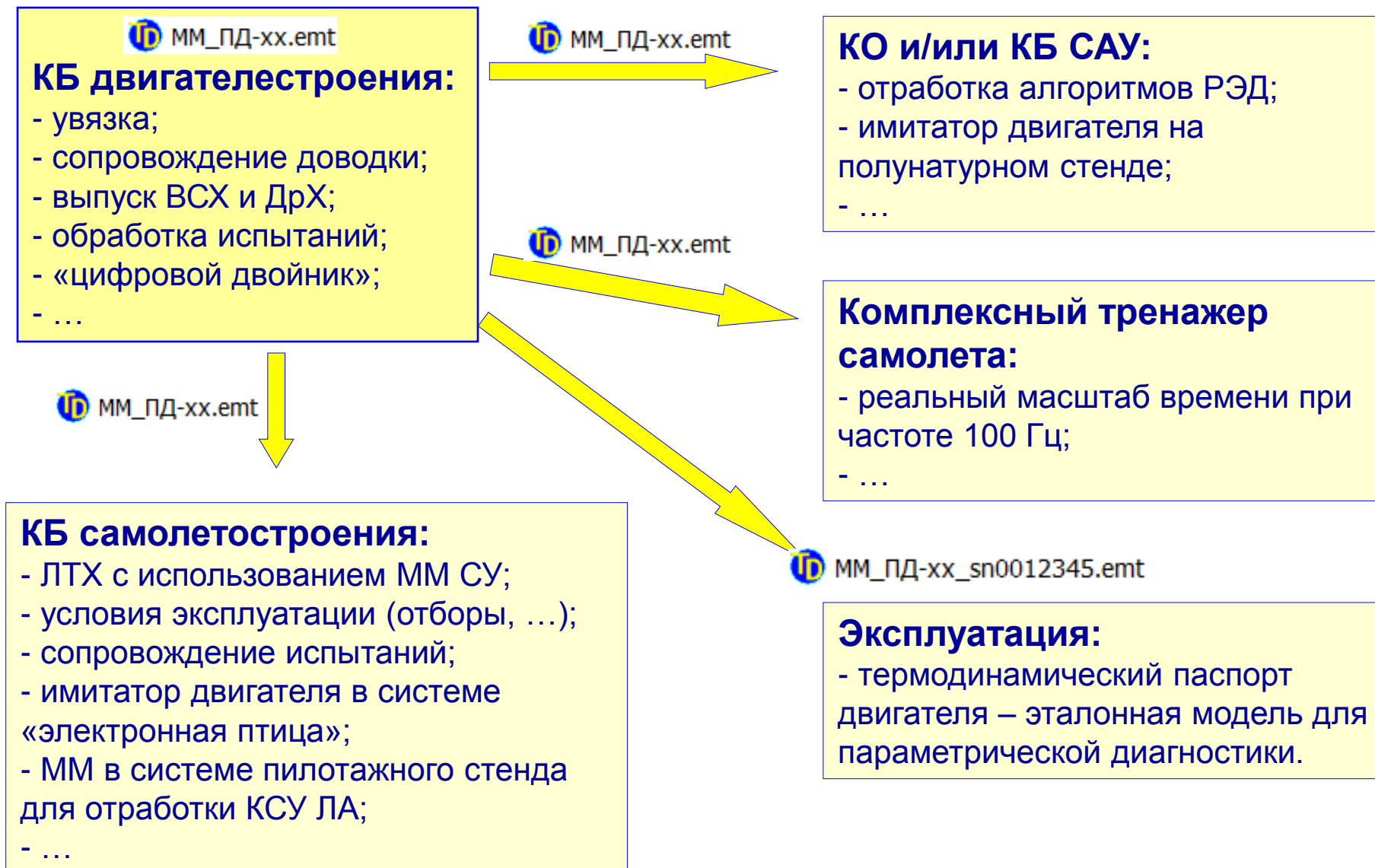
Коэффициент расхода эквивалентного решетке сопла с  $F=0.85 \text{ м}^2$



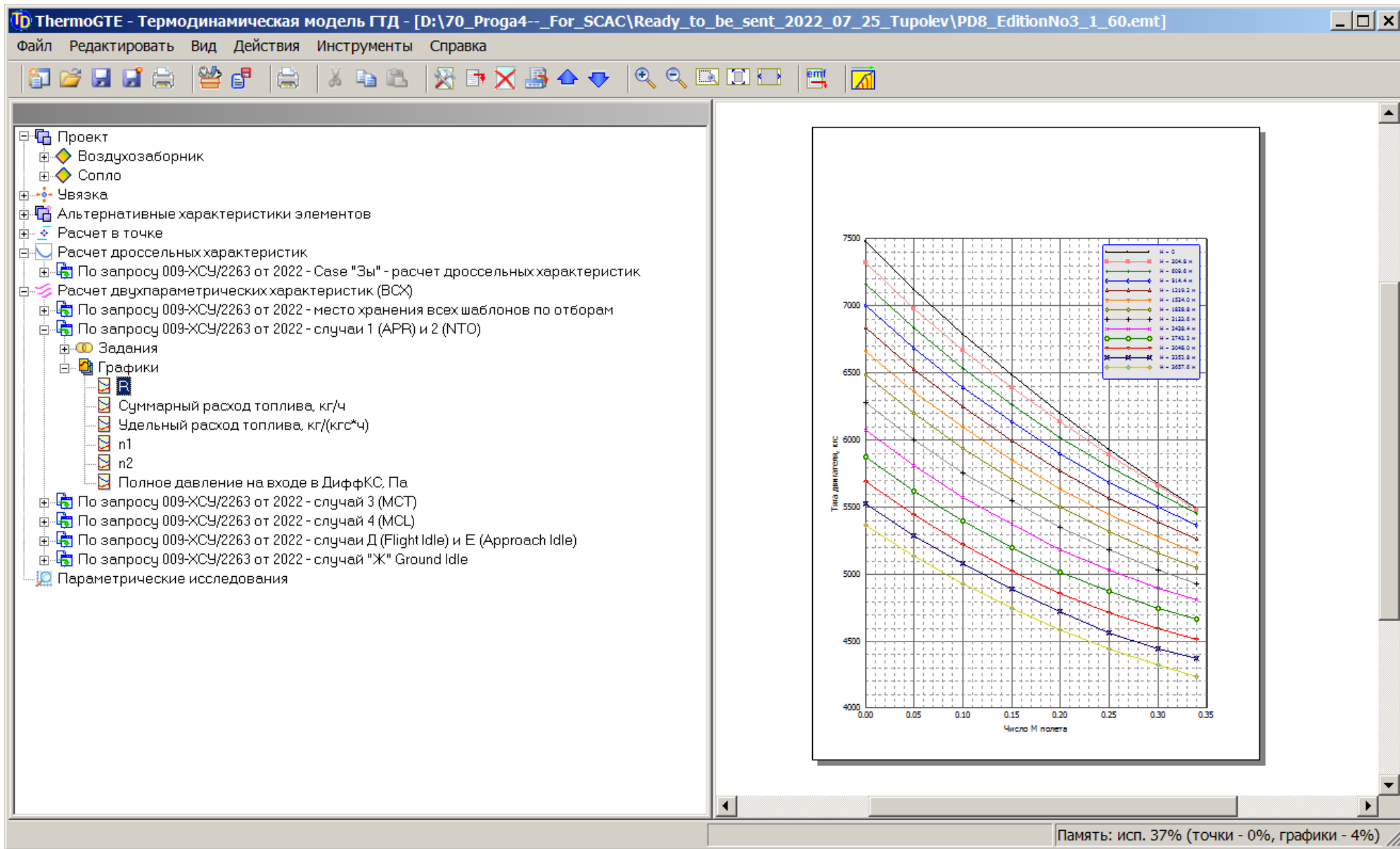
Пи сопла реверса располагаемое ( $P^*_{кр}/P_n$ )



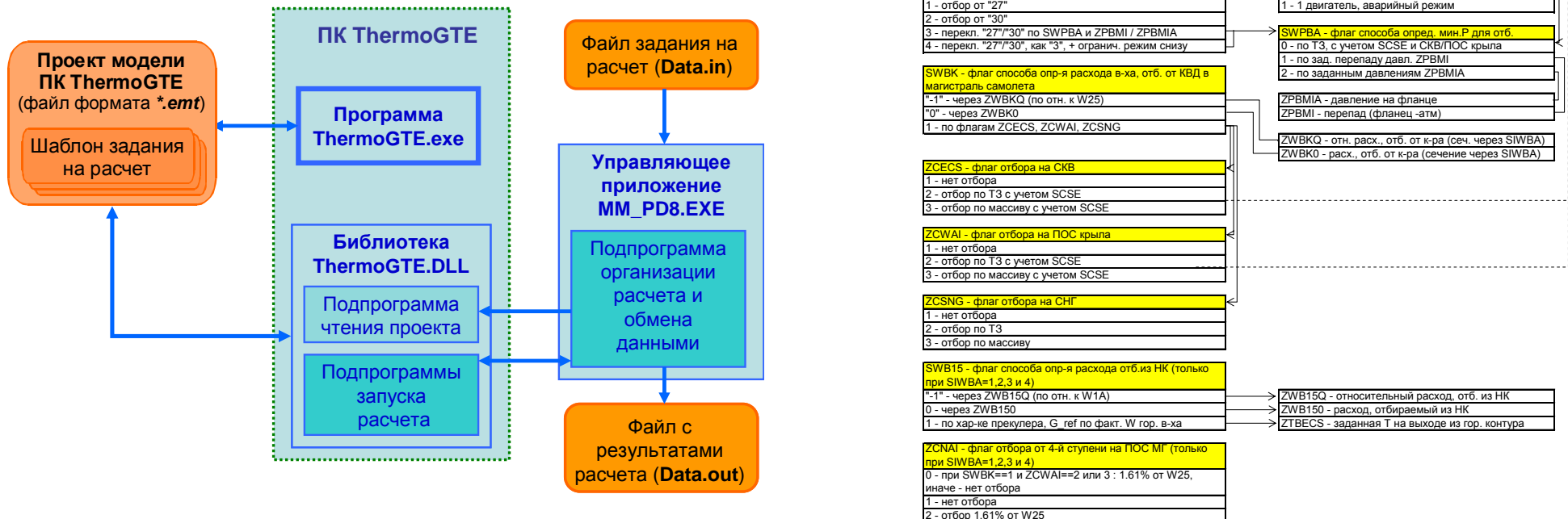
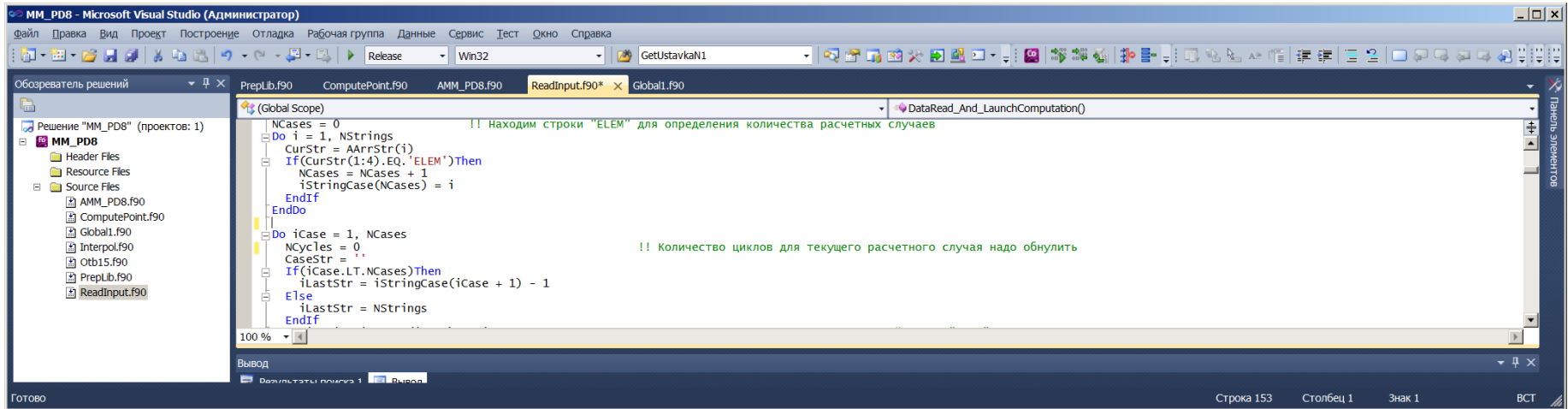
Простая технология поддержания актуального состояния ММ у всех пользователей.



# Статическая ММ для передачи заказчику



# Статическая ММ для передачи заказчику



# Статическая ММ для передачи заказчику



EngModel.cfg — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

DLLName = Ready\_to\_be\_Sent\_2022\_05\_05\ThermoGTE\_For\_MM\_PD8\ThermoGTE.dll  
ProjectName = PD8\_EditionNo3\_1\_60.emt  
OutlistFileName = OutList1.cfg  
DataInFileName = data\_Test.in  
DataOutFileName = Data\_Test.xls  
BleedFileName = DataBleed.In

OutList1.cfg — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

CASE, IERRMM, ERRINP, ZPC, PLA, ZFNIN, ZPLA, ALT, XM, DTAMB, VIAS, VTAS, ERAM1A, ZERM1A, RELHUM, WARAMB, FN, FNIN, SFC, PCN12, PCN12R, ZFHV, FHV, PAMB, P1A, TAMB, T1A, WB27, WB30, WBM1, PB27, PB30, PBM1A, PBM1, TB27, TB30, WB27Q, WB30Q, WB15, WB15Q, TB15, TBS15, PB15, EPCECS, TBECS, PWX4, XN25, XN12, T495, BPR, W1A, W1AR, WBNAI, WBNAI, WBECS, WBSNG, P13Q12, p3q2, SFCIN, W8MI, W16, W56 ;

data\_Test.in — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

ELEM  
CASE = 1. , UNITE = 0. ,  
C  
SIM = 1. , ZFHV = 43124040.0,  
ZALT = 0000. , ZXM = 0.0 , ZDTAMB = 15. ,  
ZVIAS = 0. , ZVTAS = 0. , ZPLA = 52. ,  
ZPAMB = 0. , ZTAMB = 0. , ZP1A = 0. , ZT1A = 0. ,  
C  
ZPC = 1000.0 , ZFNIN = 0. , ZFN = 0. , ZFNPC = 0. ,  
ZPCN12= 100. , ZPN12R = 0. , ZPN25R = 0. ,  
C  
ZERM1A= -1.0, ZWARAM= -1.0, ZRELHU = 0. ,  
SIPWX4= 1.0, ZPWX4 = 0. , SIWBA = 0.0, SCSE = 0.0,  
SWB15 = 1.0, ZWB150 = 0. , ZWB15Q = 0. , ZTBECS = 473.15 ,  
SWBK = 1.0, ZWBK0 = 0. , ZWBKQ = 0. ,  
SWPBA = 0.0, ZPBM1 = 0. , ZPBM1A = 0. ,  
C  
ZCECS = 2. , ZCWA1 = 2. , ZCSNG = 2.0, ZCNAI = 0. ,  
SWWOW = 1. , SWAPPR = 0. ;

D:\t\t\MM\_PD8.exe

LoadProject - IRet = 1  
\*\*\*\*\* 000050  
\*\*\*\*\*

Microsoft Excel - Data\_Test.xls

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

Введите вопрос

А1 Program MM\_PD8.exe, Release date: 22.05.2022

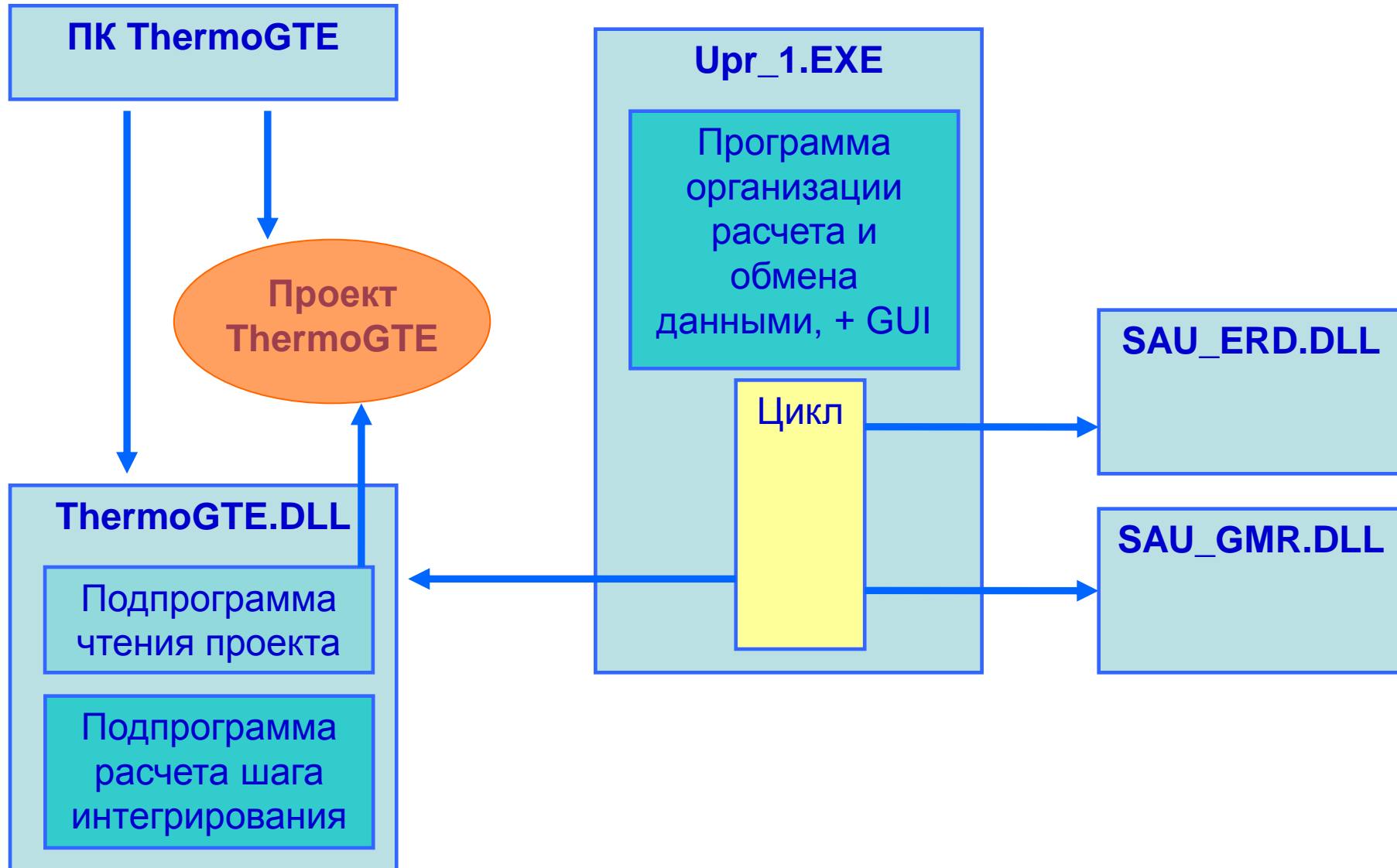
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1														
2	WARAMB	FN	FNIN	SFC	PCN12	PCN12R	ZFHV	FHV	PAMB	P1A	TAMB	T1A	WB27	WB30
3	-	N	N	kg/(daN*h,%	%	J/kg	J/kg	Pa	Pa	K	K	kg/s	kg/s	k
4	8.48E-03	2345.773	2345.773	1.250903	31.17822	31.05427	4.31E+07	4.31E+07	101325	104158.7	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
5	8.48E-03	5029.316	5029.316	0.791524	36.36094	36.21639	4.31E+07	4.31E+07	101325	104134.9	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
6	8.48E-03	7421.604	7421.604	0.65599	41.40968	41.24505	4.31E+07	4.31E+07	101325	104118.3	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
7	8.48E-03	9968.401	9968.401	0.580031	46.57747	46.3923	4.31E+07	4.31E+07	101325	104103.2	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
8	8.48E-03	12586.02	12586.02	0.540143	51.44562	51.2411	4.31E+07	4.31E+07	101325	104086.4	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
9	8.48E-03	15300.22	15300.22	0.516854	55.85561	55.63356	4.31E+07	4.31E+07	101325	104067.8	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
10	8.48E-03	18173.37	18173.37	0.500757	59.99528	59.75676	4.31E+07	4.31E+07	101325	104049.9	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
11	8.48E-03	21126.53	21126.53	0.488413	63.76957	63.51605	4.31E+07	4.31E+07	101325	104033	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
12	8.48E-03	24063.35	24063.35	0.479504	67.13761	66.8707	4.31E+07	4.31E+07	101325	104017.3	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
13	8.48E-03	26854.27	26854.27	0.473183	70.04295	69.7645	4.31E+07	4.31E+07	101325	104003.4	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
14	8.48E-03	29562.23	29562.23	0.469239	72.72596	72.43684	4.31E+07	4.31E+07	101325	103982.5	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
15	8.48E-03	32273.68	32273.68	0.466564	75.18502	74.88612	4.31E+07	4.31E+07	101325	103962.4	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
16	8.48E-03	35225.56	35225.56	0.46469	77.64448	77.33581	4.31E+07	4.31E+07	101325	103941.5	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
17	8.48E-03	37894.88	37894.88	0.463698	79.69716	79.38033	4.31E+07	4.31E+07	101325	103923.5	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
18	8.48E-03	40666.91	40666.91	0.463156	81.69421	81.36944	4.31E+07	4.31E+07	101325	103905.6	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00
19	8.48E-03	43488.06	43488.06	0.463145	83.61601	83.2836	4.31E+07	4.31E+07	101325	103886	288.15	290.4548	0.00E+00	0.00E+00

Действия Автофигуры

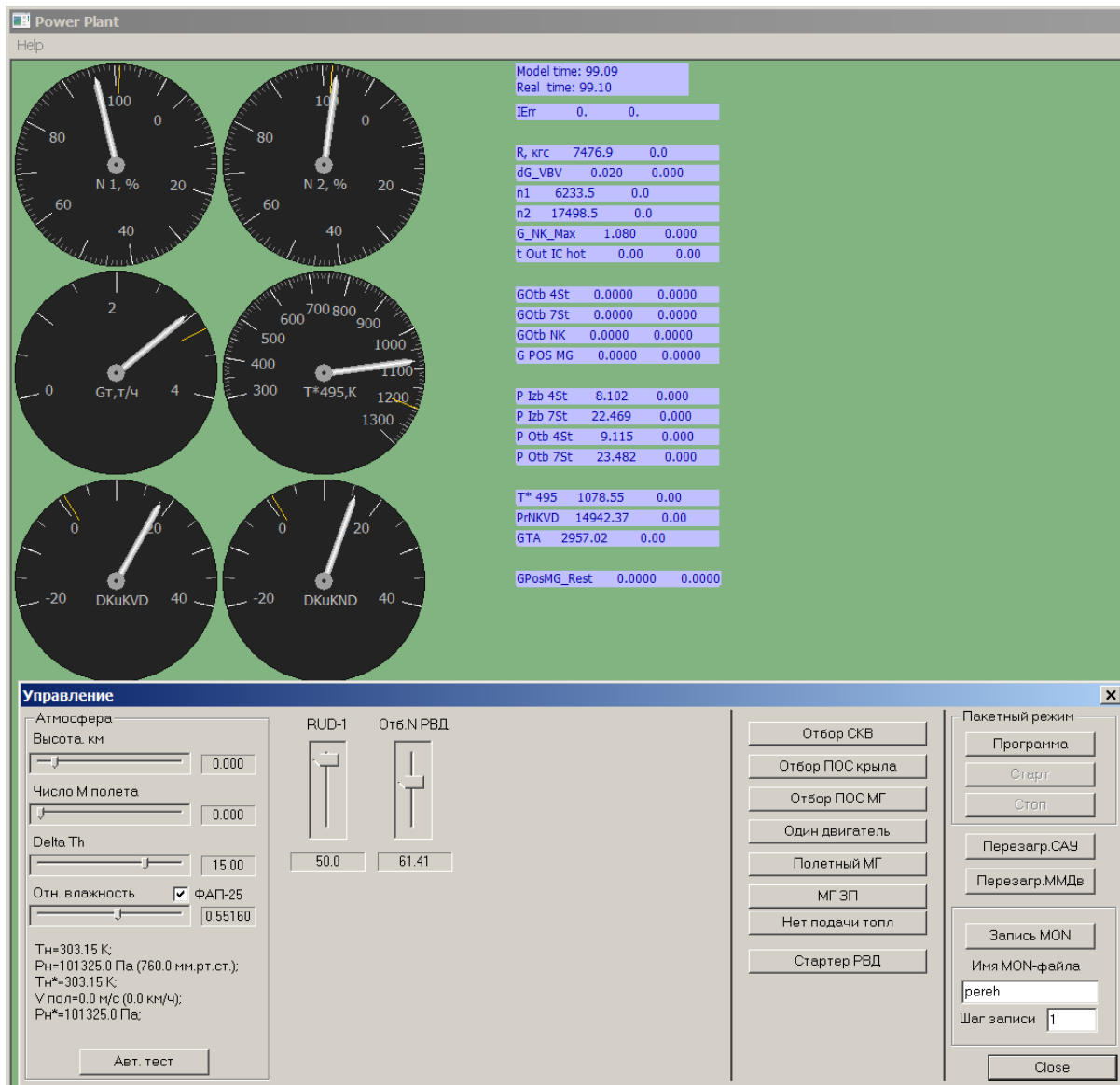
Готово

Стр 19, столб 46

# Реализация комплексной модели «Двигатель+САУ»



# Динамическая ММ для передачи заказчику



**SAU\_ERD - Microsoft Visual Studio (Администратор)**

Файл Правка Вид Проект Построение Отладка Рабочая группа Данные Сервис Тест Окно Справка

Обозреватель... SAU\_ERD.f90\*

```
Call InterpID(0, AARUD_02, AKRUD_02_Up, ARUD, CN1_AR_Up, 9, IEA
Call InterpID(0, AARUD_02, AKRUD_02_Dn, ARUD, CN1_AR_Dn, 9, IEA
Call InterpID(0, APRNKVD_DN2DTPK, ADN2DTPK_Min, PrnKVD, DN2DTPK
Call InterpID(0, APRNKVD_DN2DTPK, ADN2DTPK_Max, PrnKVD, DN2DTPK
Call InterpID(0, APRNKVD_DN2DTPK, AWK2PP_D, PrnKVD, WK2PP, 12,
If(FIStarter.EQ.1.0)DN2DTPKMax = DN2DTPKMax
If(Delta_Par.GT.0.0)Then
  CN1_AR = CN1_AR_Up
Else
  CN1_AR = CN1_AR_Dn
EndIf
DN2DTPKust = Delta_Par * B_DN2DTPK * CN1_TB * CN1_AR
If(DN2DTPKust.GT.DN2DTPKMax)DN2DTPKust = DN2DTPKMax
If(DN2DTPKust.LT.DN2DTPKMin)DN2DTPKust = DN2DTPKMin

!!// Определяем текущее значение dn2/(dt P*k)
DN2_DT = (RNV-RNVPrev) / DTST;
DN2_DT_PK = DN2_DT / (PK / 98066.5)
RNVPrev = RNV;

DeltaDN2DTPK_Prev = DeltaDN2DTPK
DeltaDN2DTPK = DN2DTPKust - DN2_DT_PK
D_DeltaDN2DTPK = (DeltaDN2DTPK - DeltaDN2DTPK_Prev) / DTST

WI_IspP = WK1PP*DeltaDN2DTPK * X_ODI
If(Abs(DeltaDN2DTPK).LT.DN2DTPKMax)WI_IspP = WI_IspP * (1.0 + C
If(DeltaDN2DTPK.LT.0.0)WI_IspP = WI_IspP * 1.5

If(WI_IspP.LT.WJIsPMin) WI_IspP = WJIsPMin
If(WI_IspP.GT.WJIsPMax) WI_IspP = WJIsPMax

WK3PP = WK4PP * Abs(DN2DTPKMax)
DWJIsP = WK3PP * DeltaDN2DTPK * DTST * X_ODI

If(WI_IspI.NE.0.0)Then
  If(DWJIsP/WI_IspI.GT.0.0)Then
    WI_IspI = WI_IspI + DWJIsP
  Else
    DWJIsP = DWJIsP * WKJIsPDecrAccel
    If(Abs(DWJIsP).GT.Abs(WI_IspI))Then
      WI_IspI = 0.0
    Else
      WI_IspI = WI_IspI + DWJIsP
    EndIf
  EndIf
Else
  WI_IspI = WI_IspI + DWJIsP
EndIf

If(WI_IspI.LT.WJIsPMin) WI_IspI = WJIsPMin
If(WI_IspI.GT.WJIsPMax) WI_IspI = WJIsPMax

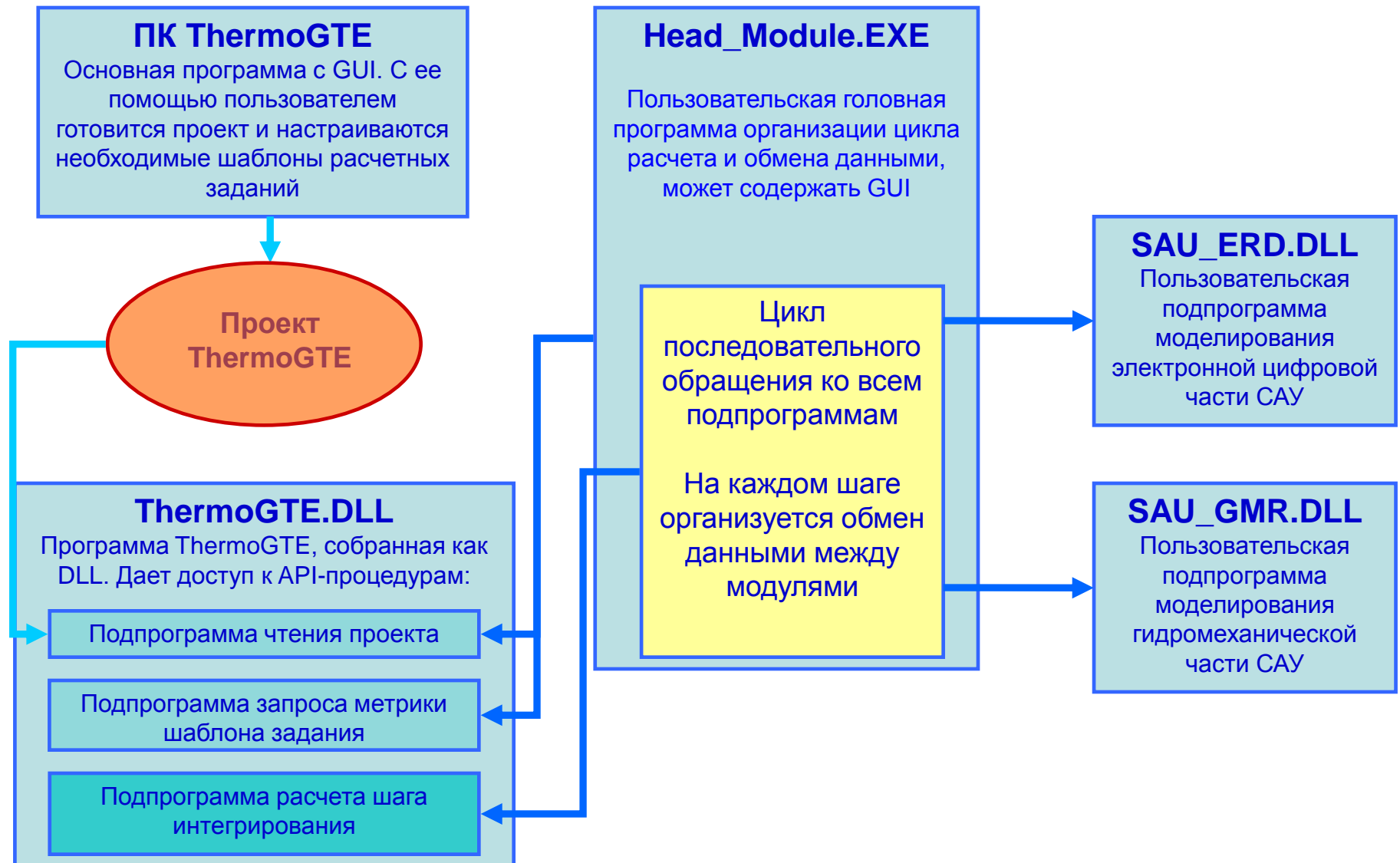
WI_IspD = D_DeltaDN2DTPK * WK2PP;
If(WI_IspD.LT.WJIsPMin) WI_IspD = WJIsPMin
If(WI_IspD.GT.WJIsPMax) WI_IspD = WJIsPMax

WrkI_IspE1 = WI_IspP + WI_IspI + WI_IspD;
If(Wrki_IspE1.GT.WJIsPE1Max)Wrki_IspE1 = WJIsPE1Max;
If(Wrki_IspE1.LT.WJIsPE1Min)Wrki_IspE1 = WJIsPE1Min;

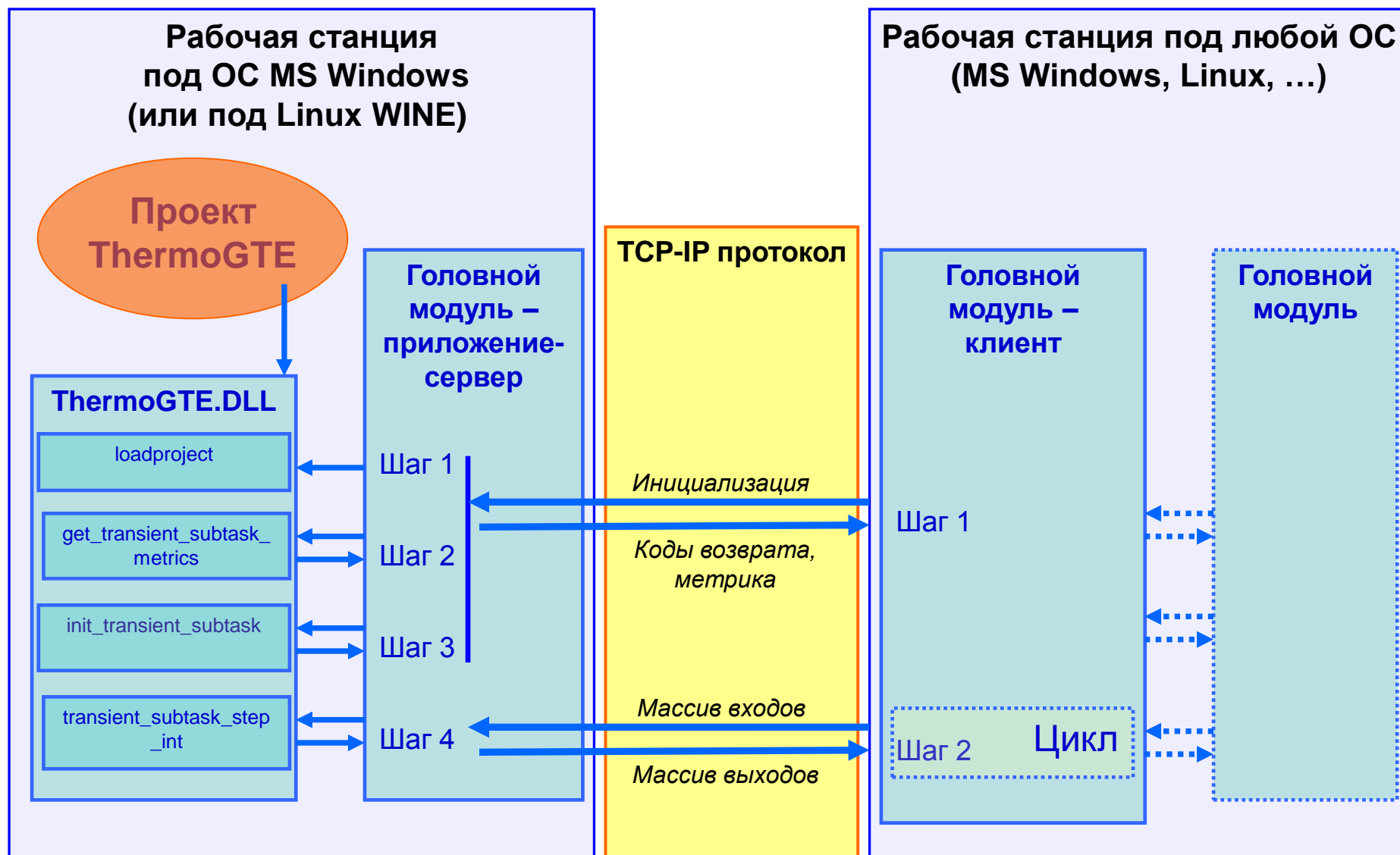
If(Abs(Wrki_IspE1).LT.WJIsPE1Sens)Wrki_IspE1 = 0.0;

EndSubroutine SAU_Trans_ERD
```

# Реализация комплексной модели «Двигатель+САУ»

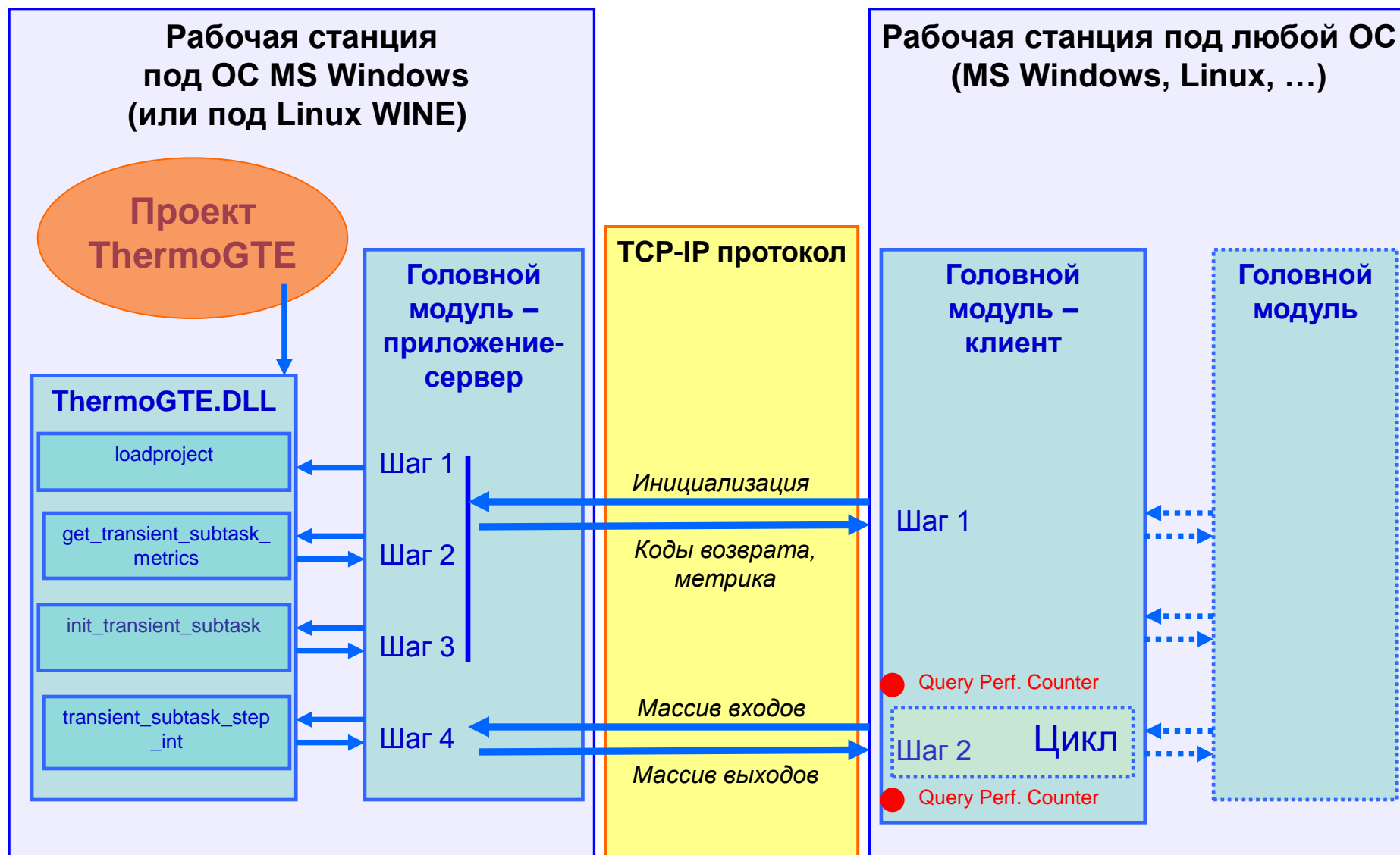


# Работа ПК ThermoGTE в режиме «Как DLL» под управлением приложения-сервера под ОС MS Windows





# Работа ПК ThermoGTE в режиме «Как DLL» под управлением приложения-сервера под ОС MS Windows



Localhost – 700 мкс; LAN – 1200 мкс (max 3000 мкс); WiFi – 5000 мкс (max 35000 мкс)

1. Разработана единая математическая модель двигателя для расчета установившихся и неуставившихся режимов работы в интересах КБ и сторонних пользователей.
2. Реализована возможность расчета пусковых и авторотационных режимов за счет использования характеристик компрессоров и турбин в альтернативной форме представления
3. Реализованы различные способы передачи математической модели двигателя сторонним пользователям
4. Обеспечена возможность расчета переходных процессов с помощью ММ двигателя с частотой обращения 100 Гц в реальном масштабе времени