

УДК 629. 7.036.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ МАСЛОСИСТЕМЫ ПРИВОДНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

*В.Т. Ширков*

*ОАО "Мотор Сич"*

Приведены результаты разработки двухуровневой диагностической модели системы смазки газотурбинного двигателя, которая обеспечивает решение задач ее оперативного диагностирования.

\* \* \*

Наведено результати розробки дворівневої діагностичної моделі системи мащення газотурбінного двигуна, яка забезпечує розв'язання задач її оперативного діагностування.

\* \* \*

There are submitted results of development of a gas-turbine engine lubrication system two-level diagnostic model which allows to begin the solution of a run-time diagnosing problem.

Предлагаемая работа направлена на решение проблемы обеспечения надежности нового поколения приводных газотурбинных установок (ГТУ), которая в значительной мере связана с нормальным функционированием их маслосистем (МС) и внедрением автоматизированных систем диагностики их технического состояния.

Анализ последних публикаций по данной проблеме [1] позволяет сделать вывод о том, что в них не рассматривается влияние отдельных дефектов на измеряемые параметры МС приводных ГТУ при различной степени их развития. Исключение составляет работа [2], в которой представлена модель дефектов МС и рассмотрено влияние засорения фильтра тонкой очистки на температуру масла на выходе из двигателя, но комплексный анализ влияния дефектов МС на ее измеряемые параметры отсутствует.

Целью данной работы является формирование методических основ решения задач диагностирования МС путем анализа связей контролируемых параметров приводной ГТУ с дефектами МС.

Объект исследования - МС приводной ГТУ на базе двигателя Д-336 в составе газоперекачивающего агрегата (ГПА) - включает в себя следующие элементы: маслобак большой емкости, устанавливаемый на ГПА, содержащий нагреватели для подогрева масла; блок охлаждения масла, устанавли-

ваемый также на ГПА и состоящий из пластинчато-ребристых секций охлаждения и двух вентиляторов; маслоагрегат, являющийся частью двигателя, состоящий из нагнетающего и четырех откачивающих насосов; фильтр тонкой очистки масла; измеритель температуры масла на входе в двигатель; воздухоотделитель; термостружкосигнализаторы и система суфлирования [4]. Контролируемыми параметрами МС являются: давление масла на входе в двигатель  $p_{м.вх}$ , температура масла на выходе из двигателя  $t_{м.вх}$  и маслоохладителя (МО)  $t_{м.вх.мо}$  и давление суфлирования  $p_{суф}$ . Их изменение в процессе эксплуатации обусловлено влиянием режима и внешних воздействий, а также дефектов.

Состав параметров, определяющих режим работы МС, выбираи с учетом следующей особенности ее нагнетающего контура: за насосом установлен редукционный клапан, ограничивающий давление на входе в двигатель путем перепуска избыточного количества масла на вход насоса. Поэтому характеристика маслосистемы, а следовательно, и ее модель, имеет два участка: на первом — давление за насосом  $p_{м.вх}$  меньше граничного и определяется температурой  $t_{м.вх}$  и частотой вращения ротора насоса  $n_n$  (или частотой вращения ротора компрессора высокого давления  $n$ ), на втором — давление постоянно и равно граничному  $p_{м.огр}$ . Тогда модель нор-

мального состояния для участков 1 и 2  $\tilde{y}_{\text{норм.1}}(\tilde{X})$  и  $\tilde{y}_{\text{норм.2}}(\tilde{X})$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\tilde{y}_{\text{норм.1}} &= f(\tilde{t}_{\text{вх}}, \tilde{p}, \tilde{t}_{\text{н}}, \tilde{p}_{\text{н}}); \\ \tilde{y}_{\text{норм.2}} &= f(\tilde{t}_{\text{вх}}, \tilde{p}_{\text{огр}}, \tilde{p}, \tilde{t}_{\text{н}}, \tilde{p}_{\text{н}}).\end{aligned}\quad (1)$$

Нами была использована модель нормального состояния МС для  $i$ -го параметра на  $j$ -м участке [2], имеющая следующий вид:

$$\begin{aligned}\tilde{y}_{ij\text{н}}(\tilde{X}) &= \tilde{C}_{ij0} + \tilde{C}_{ij1}\tilde{t}_{\text{вх}} + \tilde{C}_{ij2}\tilde{t}_{\text{вх}}^2 + \tilde{C}_{ij3}\tilde{p}_{\text{м}} + \\ &+ \tilde{C}_{ij4}\tilde{p}_{\text{огр}}^2 + \tilde{C}_{ij5}\tilde{p} + \tilde{C}_{ij6}\tilde{p}^2 + \tilde{C}_{ij7}\tilde{t}_{\text{н}} + \\ &+ \tilde{C}_{ij8}\tilde{t}_{\text{н}}^2 + \tilde{C}_{ij9}\tilde{p}_{\text{н}}.\end{aligned}\quad (2)$$

Нормирование параметров модели выполняли по формуле

$$\tilde{y} = \frac{y - y_{\text{баз}}}{y_{\text{баз}}}; \tilde{x} = \frac{x - x_{\text{баз}}}{x_{\text{баз}}},$$

где  $x_{\text{баз}}$  и  $y_{\text{баз}}$  - значения параметров на базовом режиме (для температур знаменатель имеет вид  $(t_{\text{баз}} + 273)$ ).

Из этого условия нормирования коэффициенты  $C_{ij0}$  в (2) равны нулю, а значения остальных коэффициентов для указанных участков характеристики МС, полученные путем аппроксимации результатов расчета параметров МС с использованием теплогидравлической модели рабочего процесса [4], приведены в работе [2].

На рис.1 показан характер изменения  $t_{\text{м.вых}}$  на втором участке характеристики МС при различных значениях настройки давления редукционного клапана  $p_{\text{огр}}$  и различных значениях температуры атмосферного воздуха  $t_{\text{н}}$ .

Дефекты перечисленных выше основных элементов МС можно описать соответствующими параметрами, значения которых отражают степень их развития:

засорение фильтра – изменением коэффициента гидравлического сопротивления  $\Delta\xi_{\text{ф}}$ ;

утечки масла на различных участках маслосистемы – соответствующим изменением расхода  $\Delta Q$ ;

отказ работы редукционного клапана маслососа – параметром  $\Delta\Theta_{\text{р.к}}$ ;

нарушения в работе маслоохладителя (загрязнение поверхности радиатора и выход из строя вентилятора) – изменением эффективной площади поверхности теплообмена  $\Delta F$ ;

нарушения в работе коробки приводов и подшипников опор – параметрами  $\Delta\Theta_{\text{КП}}$  и  $\Delta\Theta_{\text{Ш(Р)}}$ ;

разрушение и износ контактных уплотнений, ограничивающих масляные полости опор, – изменением зазора  $\Delta L_{\text{щ.ртку}}$ .

Влияние дефектов на параметры МС с учетом модели нормального состояния (1) может быть представлено как

$$\tilde{y} = \tilde{y}_{\text{норм.}}(\tilde{X}) + \Delta\tilde{y}(\tilde{D}),\quad (3)$$

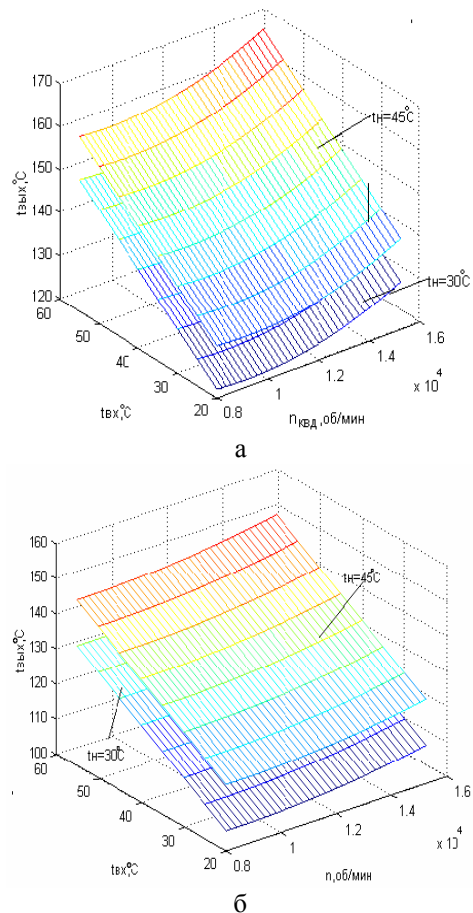


Рис.1. Изменение  $t_{\text{м.вых}}$  при различных значениях настройки давления редукционного клапана:  
а –  $p_{\text{огр}} = 2,5\text{атм}$ , б –  $p_{\text{огр}} = 3,5\text{атм}$

где  $y = (t_{\text{вых}}, p_{\text{вх}}, Q_{\text{вх}}, p_{\text{суф}}, t_{\text{выхмо}})$  - контролируемые параметры;

$\tilde{y}_{\text{норм}}(\tilde{X})$  - параметры нормального состояния;

$\tilde{D}$  - параметры дефектов.

Нормирование параметров дефектов  $\tilde{D}$  проводили аналогично приведенному выше нормированию  $\tilde{x}$  и  $\tilde{y}$ . Исключение составил параметр засорения фильтра, который определяли по следующей

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{вых}} &= h_{1.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{1.2} \Delta Q_{\text{мб-нн}} + h_{1.3} \Delta Q_{\text{нн-кнд}} + h_{1.4} \Delta Q_{\text{нн-твд}} + h_{1.5} \Delta Q_{\text{нн-ст}} + h_{1.6} \Delta Q_{\text{кнд-цво}} + \\ &+ h_{1.7} \Delta Q_{\text{твд-цво}} + h_{1.8} \Delta Q_{\text{ст-цво}} + h_{1.10} \Delta F_{\text{мо}} + h_{1.11} \Delta \Theta_{\text{кп}} + h_{1.16} \Delta \Theta_{\text{ш.кнд}} + h_{1.17} \Delta \Theta_{\text{ш.ст}} + \\ &+ h_{1.118} \Delta \alpha_{\text{вал.твд}} + h_{1.19} \Delta L_{\text{л.твд}} + h_{1.20} \Delta \Theta_{\text{ш.кнд}} + h_{1.21} \Delta \Theta_{\text{р.твд}} + h_{1.22} \Delta \Theta_{\text{р.тнд}}; \\ \Delta p_{\text{м.вх}} &= h_{3.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{3-18} \Delta \Theta_{\text{р.к}} + h_{3-19} \Delta \Theta_{\text{нн}}; \\ \Delta Q &= h_{4.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{4.2} \Delta Q_{\text{мб-нн}} + h_{4.3} \Delta Q_{\text{нн-кнд}} + h_{4.4} \Delta Q_{\text{нн-твд}} + h_{4.5} \Delta Q_{\text{нн-ст}} + h_{4.6} \Delta Q_{\text{кнд-цво}} + \\ &+ h_{4.7} \Delta Q_{\text{твд-цво}} + h_{4.8} \Delta Q_{\text{ст-цво}}; \\ \Delta p_{\text{суф}} &= h_{5.12} \Delta L_{\text{ш.ртку.кнд}} + h_{5.13} \Delta L_{\text{ш.ртку.квд}} + h_{5.14} \Delta L_{\text{л.квд}} + h_{5.15} \Delta L_{\text{л.левый.квд}} + \\ &+ h_{5.16} \Delta L_{\text{л.правый.квд}} + h_{5.17} \Delta S_{\text{суф}}; \\ \Delta t_{\text{вых.мо}} &= h_{6.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{6.3} \Delta Q_{\text{нн-кнд}} + h_{6.4} \Delta Q_{\text{нн-твд}} + h_{6.5} \Delta Q_{\text{нн-ст}} + h_{6.6} \Delta Q_{\text{кнд-цво}} + \\ &+ h_{6.7} \Delta Q_{\text{твд-цво}} + h_{6.8} \Delta Q_{\text{ст-цво}} + h_{6.9} \Delta Q_{\text{дв-мо}} + h_{6.10} \Delta F_{\text{мо}} + h_{6.11} \Delta \Theta_{\text{кп}} + h_{6.17} \Delta \Theta_{\text{ш.ст}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Значения коэффициентов модели (4) представлены в работе [2], малозначимые дефекты при этом не включены.

$$\text{формуле: } \Delta \xi_{\phi} = \frac{\xi_{\phi} - \xi_{\phi.\text{баз}}}{\xi_{\phi.\text{max}} - \xi_{\phi.\text{баз}}}.$$

Моделирование дефектов МС, выполненное с использованием математической модели рабочего процесса МС [4] и ее программной реализации [5], подтвердило линейный характер их влияния на параметры маслосистемы. Это позволяет представить входящую в (3) модель дефектов в следующем виде:

Подставив (2) и (4) в (3), получим полную диагностическую модель МС, которая имеет следующий вид:  
— для первого участка МС:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{\text{вых}} &= 0,107 \tilde{t}_{\text{вх}} + 90,88 \tilde{t}_{\text{вх}}^2 + 0,046 \tilde{p} + 0,105 \tilde{p}^2 + 0,549 \tilde{t}_{\text{н}} + h_{1.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{1.2} \Delta Q_{\text{мб-нн}} + h_{1.3} \Delta Q_{\text{нн-кнд}} + \\ &+ h_{1.4} \Delta Q_{\text{нн-твд}} + h_{1.5} \Delta Q_{\text{нн-ст}} + h_{1.6} \Delta Q_{\text{кнд-цво}} + h_{1.7} \Delta Q_{\text{твд-цво}} + h_{1.8} \Delta Q_{\text{ст-цво}} + h_{1.10} \Delta F_{\text{мо}} + \\ &+ h_{1.11} \Delta \Theta_{\text{кп}} + h_{1.16} \Delta \Theta_{\text{ш.кнд}} + h_{1.17} \Delta \Theta_{\text{ш.ст}} + h_{1.118} \Delta \alpha_{\text{вал.твд}} + h_{1.19} \Delta L_{\text{л.твд}} + h_{1.20} \Delta \Theta_{\text{ш.кнд}} + \\ &+ h_{1.21} \Delta \Theta_{\text{р.твд}} + h_{1.22} \Delta \Theta_{\text{р.тнд}}; \\ \tilde{Q}_{\text{вх}} &= 5,81 \tilde{t}_{\text{вх}} + 283,9 \tilde{t}_{\text{вх}}^2 + 0,102 \tilde{p} + h_{3.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{3-18} \Delta \Theta_{\text{р.к}} + h_{4.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{4.2} \Delta Q_{\text{мб-нн}} + h_{4.3} \Delta Q_{\text{нн-кнд}} + \\ &+ h_{4.4} \Delta Q_{\text{нн-твд}} + h_{4.5} \Delta Q_{\text{нн-ст}} + h_{4.6} \Delta Q_{\text{кнд-цво}} + h_{4.7} \Delta Q_{\text{твд-цво}} + h_{4.8} \Delta Q_{\text{ст-цво}}; \\ \tilde{p}_{\text{вх}} &= 3,582 \tilde{t}_{\text{вх}} - 275,7 \tilde{t}_{\text{вх}}^2 + 0,135 \tilde{p} - 0,514 \tilde{p}^2 + h_{3.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{3-18} \Delta \Theta_{\text{р.к}}; \\ \tilde{t}_{\text{вых.мо}} &= 2,604 \tilde{t}_{\text{вх}} - 0,569 \tilde{t}_{\text{н}} - 21,1 \tilde{t}_{\text{н}}^2 + h_{6.1} \Delta \xi_{\phi} + h_{6.3} \Delta Q_{\text{нн-кнд}} + h_{6.4} \Delta Q_{\text{нн-твд}} + h_{6.5} \Delta Q_{\text{нн-ст}} + \\ &+ h_{6.6} \Delta Q_{\text{кнд-цво}} + h_{6.7} \Delta Q_{\text{твд-цво}} + h_{6.8} \Delta Q_{\text{ст-цво}} + h_{6.9} \Delta Q_{\text{дв-мо}} + h_{6.10} \Delta F_{\text{мо}} + \\ &+ h_{6.11} \Delta \Theta_{\text{кп}} + h_{6.17} \Delta \Theta_{\text{ш.ст}}; \\ \tilde{p}_{\text{суф}} &= 1,608 \tilde{p} + 2,0 \tilde{p}^2 + 0,368 \tilde{p}_{\text{н}} + h_{5.12} \Delta L_{\text{ш.ртку.кнд}} + h_{5.13} \Delta L_{\text{ш.ртку.квд}} + h_{5.14} \Delta L_{\text{л.квд}} + \\ &+ h_{5.15} \Delta L_{\text{л.левый.квд}} + h_{5.16} \Delta L_{\text{л.правый.квд}} + h_{5.17} \Delta S_{\text{суф}}; \end{aligned} \quad (5)$$

- для второго участка МС:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{\text{ВЫХ}} &= 0,654\tilde{t}_{\text{ВХ}} + 0,076\tilde{p}_{\text{ОГР}} - 0,095\tilde{p}_{\text{ОГР}}^2 + 0,128\tilde{n} + 0,561\tilde{t}_{\text{Н}} + h_{1.1}\Delta\xi_{\text{Ф}} + h_{1.2}\Delta Q_{\text{МБ-НН}} + h_{1.3}\Delta Q_{\text{НН-КНД}} + \\ &+ h_{1.4}\Delta Q_{\text{НН-ТВД}} + h_{1.5}\Delta Q_{\text{НН-СТ}} + h_{1.6}\Delta Q_{\text{КНД-ЦВО}} + h_{1.7}\Delta Q_{\text{ТВД-ЦВО}} + h_{1.8}\Delta Q_{\text{СТ-ЦВО}} + \\ &+ h_{1.10}\Delta F_{\text{МО}} + h_{1.11}\Delta\Theta_{\text{КП}} + h_{1.16}\Delta\Theta_{\text{Ш.КНД}} + h_{1.17}\Delta\Theta_{\text{Ш.СТ}} + h_{1.118}\Delta a_{\text{ВАЛ.ТВД}} + h_{1.19}\Delta L_{\text{Л.ТВД}} + \\ &+ h_{1.20}\Delta\Theta_{\text{Ш.КНД}} + h_{1.21}\Delta\Theta_{\text{Р.ТВД}} + h_{1.22}\Delta\Theta_{\text{Р.ТНД}}; \\ \tilde{Q}_{\text{ВХ}} &= 25,25\tilde{t}_{\text{ВХ}} + 0,468\tilde{p}_{\text{ОГР}} + 1,0\tilde{n} + h_{4.1}\Delta\xi_{\text{Ф}} + h_{4.2}\Delta Q_{\text{МБ-НН}} + h_{4.3}\Delta Q_{\text{НН-КНД}} + h_{4.4}\Delta Q_{\text{НН-ТВД}} + \\ &+ h_{4.5}\Delta Q_{\text{НН-СТ}} + h_{4.6}\Delta Q_{\text{КНД-ЦВО}} + h_{4.7}\Delta Q_{\text{ТВД-ЦВО}} + h_{4.8}\Delta Q_{\text{СТ-ЦВО}}; \\ \tilde{p}_{\text{ВХ}} &= 19,3\tilde{t}_{\text{ВХ}} + 0,987\tilde{p}_{\text{ОГР}} + h_{31}\Delta\xi_{\text{Ф}} + h_{3-18}\Delta\Theta_{\text{Р.К}}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{\text{ВЫХ МО}} &= -0,918\tilde{t}_{\text{ВХ}} + 12,33\tilde{t}_{\text{ВХ}}^2 + 0,062\tilde{p}_{\text{ОГР}} + 1,169\tilde{t}_{\text{Н}} + h_{6.1}\Delta\xi_{\text{Ф}} + h_{6.3}\Delta Q_{\text{НН-КНД}} + h_{6.4}\Delta Q_{\text{НН-ТВД}} + \\ &+ h_{6.5}\Delta Q_{\text{НН-СТ}} + h_{6.6}\Delta Q_{\text{КНД-ЦВО}} + h_{6.7}\Delta Q_{\text{ТВД-ЦВО}} + h_{6.8}\Delta Q_{\text{СТ-ЦВО}} + h_{6.9}\Delta Q_{\text{ДВ-МО}} + \\ &+ h_{6.10}\Delta F_{\text{МО}} + h_{6.11}\Delta\Theta_{\text{КП}} + h_{6.17}\Delta\Theta_{\text{Ш.СТ}}; \\ \tilde{p}_{\text{СУФ}} &= -8,85\tilde{t}_{\text{ВХ}} + 2,254\tilde{n} + 2,034\tilde{p}_{\text{Н}} + h_{5.12}\Delta L_{\text{Ш.РТКУ.КНД}} + h_{5.13}\Delta L_{\text{Ш.РТКУ.КВД}} + h_{5.14}\Delta L_{\text{Л.КВД}} + \\ &+ h_{5.15}\Delta L_{\text{Л.ЛЕВЫЙ.КВД}} + h_{5.16}\Delta L_{\text{Л.ПРАВЫЙ.КВД}} + h_{5.17}\Delta S_{\text{СУФ}}. \end{aligned}$$

Нами было исследовано влияние ряда дефектов на один из важнейших параметров маслосистемы – температуру масла на выходе из двигателя  $t_{\text{м.вых}}$ . Внешние воздействия на МС двигателя задавались параметрами  $t_{\text{Н}}$  и  $p_{\text{Н}}$ .

В качестве примера рассмотрено влияние засорения фильтра тонкой очистки, утечки на участке нагнетающий насос – опора турбины высокого давления, загрязнение поверхности теплообмена маслоохладителя и суммарное действие указанных выше дефектов на изменение  $t_{\text{м.вых}}$  при значении  $p_{\text{ОГР}} = 3,5$  атм.

Результаты расчетов показаны в виде графиков (рис. 2), которые позволяют рассмотреть влияние указанных выше дефектов на  $t_{\text{м.вых}}$  при  $t_{\text{Н}} = 45^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{ОГР}} = 3,5$  атм.

Влияние засорения фильтра на  $t_{\text{м.вых}}$  показано на рис.2,а,б. Уровень засорения фильтра был выбран равным 65%, при этом  $t_{\text{м.вых}}$  увеличивается относительно нормального состояния МС более чем на  $20^{\circ}\text{C}$ . Влияние утечки масла отражено на рис.2,г. При утечке 0,86 л/мин  $t_{\text{м.вых}}$  повысилась на  $8...10^{\circ}\text{C}$ .

Нарушение нормального теплообмена в МО вследствие загрязнения внешней поверхности радиатора (коэффициент теплоотдачи изменен с 12 (норма) на  $10 \text{ кВт/м}^2\text{К}$ ) показано на рис. 2,д.

Исследованные дефекты приводят к существенному повышению температуры в маслобаке и, следовательно, к повышению температуры на входе в двигатель. Суммарное влияние перечисленных дефектов отобразено на рис 2,в.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что разработана модель системы смазки газотурбинного двигателя, которая обеспечивает определение значений таких параметров МС, как  $t_{\text{м.вых}}$ ,  $p_{\text{ВХ}}$ ,  $Q_{\text{ВХ}}$ ,  $t_{\text{ВЫХМО}}$ ,  $p_{\text{СУФ}}$ , при различных режимах работы двигателя ( $n$ ) и внешних воздействиях ( $t_{\text{Н}}$  и  $p_{\text{Н}}$ ) с учетом наличия различных дефектов и таким образом позволяет решать задачу ее оперативно-го диагностирования.

## Литература

1. Жернаков С.В. Адаптивная диагностическая экспертная система // Проблемы машиностроения и надежность машин. - 2002.-№1.-С. 92-99.

2. Ширков В.Т., Епифанов С.В., Гусев Ю.А. Моделирование маслосистем приводных ГТД для решения задач оперативного диагностирования // Авиационно - космическая техника и технология: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2002.- Вып. 30. Двигатели и энергоустановки.- С. 197-303.

3. Ширков В.Т., Епифанов С.В., Гусев Ю.А. Анализ масляной системы газотурбинного привода как объекта диагностирования // Авиационно - космическая техника и технология: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 1999.- Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки.– С. 207-213.

4. Ширков В.Т., Епифанов С.В., Гусев Ю.А. Диагностическая модель маслосистемы газотурбинного привода для газоперекачивающего агрегата//

Сб. науч. тр. - Харьков: ХАИ, 2000 – Вып.19 Тепловые двигатели и энергоустановки. - С. 400-407.

5. Программная реализация математической модели маслосистемы турбовального приводного ГТД / В.Т. Ширков, В.С. Чигрин, С.В. Епифанов, Ю.А. Гусев // Авиационно- космическая техника и технология: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2001.- Вып. 23. Двигатели и энергоустановки.- С. 64-66.

*Поступила в редакцию 5.05.03*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор Вель В.Е., Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков.

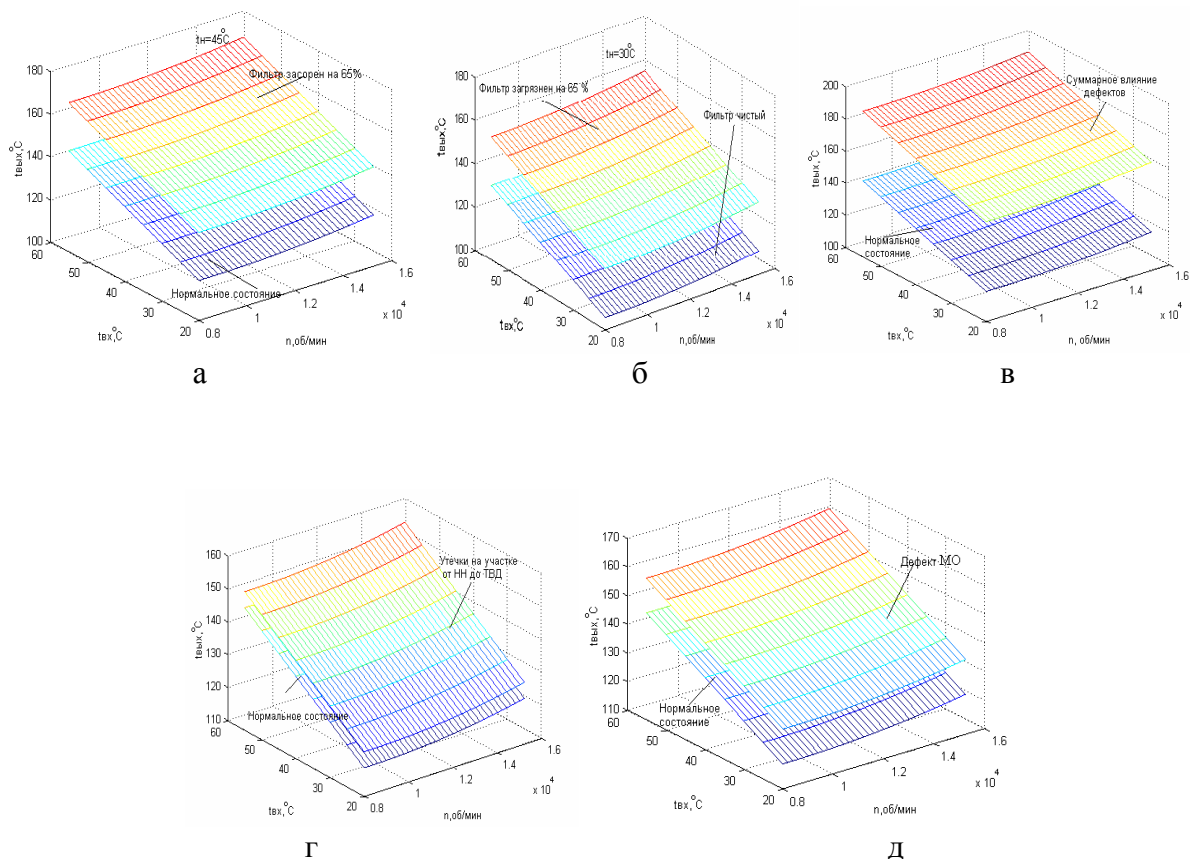


Рис. 2. Влияние дефектов на температуру масла