

УДК 621.165:539.4

**В.П. СУХИНИН**, д-р техн. наук; проф. УИПА, Харьков;  
**Т.Н. ПУГАЧЕВА**, канд. техн. наук; доц. УИПА, Харьков

### АНАЛИЗ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ТЕРМОРАЗГРУЗОЧНЫХ КАНАВКАХ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В последнее время блоки, предназначенные и спроектированные для несения базовых нагрузок, несут пиковые нагрузки и число пусков-остановок их на отдельных турбинах достигло 1600. При пусках и остановках турбины на поверхности ротора возникают термические напряжения, которые обуславливают достижение в зонах концентрации высоких суммарных напряжений, которые приводят к образованию трещин в высокотемпературных зонах элементов турбоустановок.

Останнім часом блоки, призначені і спроектовані для несення базових навантажень, несуть пікові навантаження і число пусків-зупинок їх на окремих турбінах досягло 1600. При пусках і зупинках турбіни на поверхні ротора виникають термічні напруги, які обумовлюють досягнення в зонах концентрації високих сумарних напруг, які приводять до утворення тріщин у високотемпературних зонах елементів турбоустановок.

Lately the blocks intended and projected for executions of the base loadings carry the spades loadings and number of starting – stopping they were attained by 1600 on separate turbines. At starting and stopping turbines there are thermal tensions on the surface of rotor for conditioning achievement in the zones of concentration of high total tensions which result in formation of cracks in the high temperature zones of elements of turbine.

#### Введение

Эксплуатация энергоблоков с большим количеством пусков-остановок приводит к образованию трещин в высокотемпературных зонах элементов турбоустановок. Появление трещин вызывает обоснованные опасения в безопасности дальнейшей эксплуатации энергооборудования.

Циклическое воздействие нестационарных температурных напряжений в роторах высокого и среднего давления при работе турбин в переменных режимах создает опасность малоцикловых термоусталостных повреждений металла в зонах концентраторов напряжений на поверхности роторов, к которым относятся терморазгрузочные канавки, галтели в месте перехода от полотна диска к цилиндрической поверхности вала и др. (рис. 1).

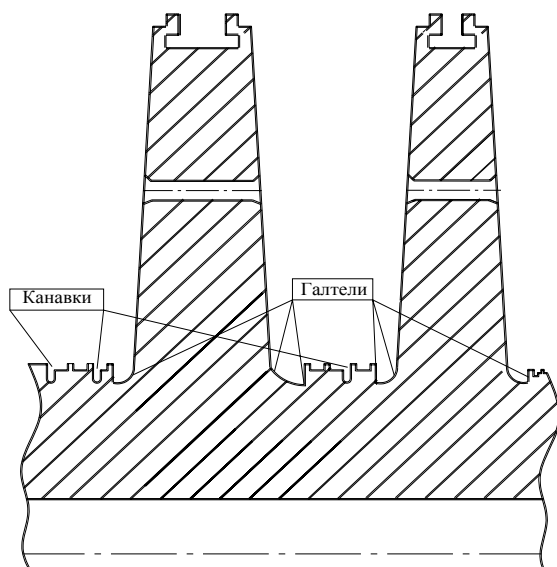


Рис. 1. Концентраторы напряжений на поверхности ротора паровых турбин

На отдельных турбинах мощностью 200 МВт (К-200-130) и 300 МВт (К-300-240) были выявлены в термокомпенсационных канавках роторов высокого и среднего давления кольцевые трещины глубиной до 2–3 мм. Поскольку эти трещины возникают в зонах, где отсутствуют высокие напряжения от центробежных сил, следует считать основной причиной их появления

малоцикловую усталость от термических напряжений, возникающих в пуско-остановочных и переходных режимах.

#### **Анализ предыдущих исследований**

При анализе напряженного состояния турбинных роторов до сих пор используются величины коэффициентов концентрации напряжений на основе решения плоской задачи теории упругости широко представленные в [1, 2]. Не получило достаточного развития решение объемного напряженного состояния в рассматриваемой зоне и, таким образом, отсутствует возможность выбора наиболее близких к реальным значениям коэффициентов концентрации.

#### **Цель работы**

Сравнительный анализ коэффициентов концентрации напряжений и деформаций на основе известных приближенных решений и результатов, выполненных авторами расчетов осесимметричной задачи методом конечных элементов.

#### **Материал и результаты исследований**

Расчетная оценка долговечности роторов, работающих при переменных температурных напряжениях, проводится на основе малоциклового и термоусталостной прочности материалов и конструкций. При расчете допускаемого числа циклов  $N$  до повреждения используется величина изменения в цикле полной деформации  $\Delta\epsilon$  или размах условных напряжений  $\Delta\sigma$ , в которые входят такие величины как модуль упругости, предел прочности, предел усталости и др. Однако, имеется ряд факторов, существенно влияющих на накопление повреждаемости и долговечности роторов при переменных режимах. К ним относятся концентрация напряжений и деформаций, сложнопластическое состояние ротора, характер цикла изменения напряжения, совместное действие усталости и ползучести и др.

Высокая концентрация деформаций в зоне терморазгрузочных канавок оказывает существенное влияние на их долговечность.

При упругопластическом деформировании даже при невысокой номинальной напряженности конструкции в зонах концентраторов напряжения могут превосходить предел текучести и при малоцикловом нагружении в этих зонах будет происходить поцикловое изменение напряженно-деформированного состояния (НДС), обусловленное пластическим деформированием материала. Даже при практически стационарном нагружении процессы упругопластического деформирования материала в окрестностях концентратора, как правило, являются нестационарными и характеризуются непрерывной трансформацией полей деформаций и напряжений в пределах цикла нагружения и от цикла к циклу. При этом поля напряжений и деформаций являются неоднородными и отличаются высокими градиентами. В зависимости от режимов нагружения, циклических свойств материала, характера концентратора и уровня напряжений разрушение в таких локальных зонах может иметь квазистатический или усталостный характер.

В связи с тем, что точных аналитических решений соответствующих задач в нелинейной постановке нет, процессы трансформации полей напряжений и деформаций в локальных областях возле концентраторов при упругопластическом деформировании исследуются в каждом конкретном случае приближенными методами теории пластичности, численными и экспериментальными методами. Приближенные методы позволяют с достаточной, в большинстве случаев, точностью определять значения коэффициентов концентрации и описывать кинетику напряжений и деформаций как при однократном, так и при переменном-повторном нагружениях. При этом основной гипотезой, позволяющей оценить изменение местных напряжений в

зоне концентрации, является гипотеза о соответствии значений коэффициента концентрации деформации  $K_\varepsilon$  значениям теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$ . Базируясь на этой гипотезе, с учетом некоторых других предположений можно получить систему уравнений для определения местных напряжений  $\bar{\sigma}_{\max_k}$  и местных деформаций  $\bar{\varepsilon}_{\max_k}$  и коэффициентов концентрации напряжений  $K_\sigma = \frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\sigma_H}$  и деформаций  $K_\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max}}{\varepsilon_H}$ .

$$\left. \begin{aligned} K_\varepsilon &= \alpha_\sigma; \bar{\varepsilon}_{\max_k} = \bar{\varepsilon}_H \cdot K_\varepsilon = \bar{\varepsilon}_H \cdot \alpha_\sigma; \\ \bar{\sigma}_{\max_k} &= (\bar{\varepsilon}_H \cdot \alpha_\sigma)^m; K_\sigma = \frac{1}{\bar{\sigma}_H} \cdot (\bar{\varepsilon}_H \cdot \alpha_\sigma)^m; \\ \bar{\sigma}_{\max_k} &= 1 + \bar{E}_T \cdot [(\bar{\varepsilon}_H \cdot \alpha_\sigma) - 1]; \\ K_\sigma &= \frac{1}{\bar{\sigma}_H} \cdot \{1 + \bar{E}_T \cdot [(\bar{\varepsilon}_H \cdot \alpha_\sigma) - 1]\}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где черта над величинами означает напряжения и деформации, отнесенные к пределу текучести  $\sigma_T$  и соответствующей деформации  $\varepsilon_T$ ;  $\bar{E}_T$  – относительный модуль упрочнения; индекс «н» обозначает номинальные значения величин; индекс «m» – характеристика упрочнения материала в упругопластической области ( $0 \leq m \leq 1$ ).

При идеально упругом деформировании материала ( $m = \bar{E}_T = 1$ ) из (1) следует равенство  $K_\sigma = K_\varepsilon = \alpha_\sigma$ . Для реальных значений  $m$  и  $\bar{E}_T$  использование уравнений (1) приводит к занижению значений местных деформаций  $\bar{\varepsilon}_{\max_k}$  в зонах концентрации по сравнению с действительными (измеренными) значениями, что является весьма опасным при использовании результатов прочностных расчетов.

Уточнение коэффициентов концентрации осуществляется введением в уравнения (1) поправочных функций и постоянных множителей, определяемых по диаграмме деформирования, а также на основе допущений о равенстве энергий деформации в зоне концентрации для стадий упругого и упругопластического деформирования. Для определения расчетных значений максимальных напряжений и деформаций в наиболее опасной точке конструкции при известной диаграмме статического деформирования материала  $\sigma = f(\varepsilon)$  и номинальных характеристиках  $\sigma_H$  и  $\varepsilon_H$  предложен ряд соотношений, из которых наибольшее распространение получили зависимости Нейбера, Махутова, Всесоюзнотехнического института (ВТИ):

$$\begin{aligned} K_z(\infty) &= 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho}}, \\ K_z(\infty) &= \sigma_z \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \rho}, \\ K_z(\infty) &= 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho} \cdot \frac{0,42 \cdot \sigma_{zn}(\rho_1) + 0,58 \cdot \sigma_{zn}(\rho_2)}{\sigma_{zn}(\rho_2)}}. \end{aligned}$$

Для определения уровня местных условно упругих осевых напряжений  $\sigma_z$  и интенсивностей упруго-пластических деформаций  $\varepsilon_i$  в зонах кольцевых терморазгрузочных канавок реальных роторов, подверженных воздействию силовых нагрузок и температурных напряжений, необходимо выполнить достаточно трудоемкие расчеты общего НДС ротора методом конечных элементов. Расчеты еще более

усложняются при сгущении сетки для большей дискретизации нерегулярных зон конструкции (места сопряжения различных по форме элементов) с определением здесь местных напряжений и коэффициентов концентрации.

В связи с этим зачастую подобные расчеты стремятся упростить путем использования коэффициентов концентрации напряжений и деформаций, которые определяются в узкой области без учета остальных особенностей всей конструкции ротора.

Имеются несколько приближенных способов определения коэффициентов концентрации условно упругих напряжений, как в одиночных кольцевых канавках, так и в цепочке канавок с постоянным шагом.

В таблице приведены некоторые результаты расчета по методу конечных элементов (МКЭ) коэффициентов концентрации условно-упругих осевых напряжений  $K_{\sigma_z}$ , интенсивностей напряжений  $K_{\sigma_i}$  и интенсивностей упруго-пластических деформаций  $K_{\varepsilon_i}$  в терморазгрузочной канавке думмиса ротора СД турбины К-200-130 в различные моменты нескольких режимов работы турбины: пуск из горячего состояния после 2 часов 30 минут (ПГС), стационарный режим (СР), пуск из холодного состояния после 9 часов 20 минут (ПХС). Рассматривались пуски без предварительного прогрева уплотнений. Ротор подвергался одновременному воздействию центробежных сил (практически не влияющих на уровень  $K_{\sigma_z}$ ) и двухмерных температурных полей. Поскольку сгущение сетки в каждом случае выполнялось только в зоне одной канавки, учет влияния соседних канавок выполняется приближенно с помощью формул предложенных ВТИ.

Таблица  
Коэффициент концентрации напряжений и деформаций на поверхности канавки

Режим	ПГС	СР	ПХС
$K_{\sigma_z}$ (МКЭ)	5,821	2,09	6,111
$K_{\sigma_i}$ (МКЭ)	2,283	2,269	–
$K_{\varepsilon_i}$ (Нейбер)	8,204	–	–
$K_{\varepsilon_i}$ (МКЭ)	6,145	–	–
$K_{\varepsilon_i}$ (ВТИ)	5,952	5,720	6,0
$K_{\varepsilon_i}$ (Махутова)	6,966	–	–

Во всех приближенных формулах учитывается изменение температуры по радиусу и не учитываются особенности конструкции ротора в области ближайшей к канавке (канавка в бесконечно гладком вале). Сопоставление результатов приближенных вычислений с данными расчета МКЭ позволяют судить о степени достоверности приближенных вычислений.

Как следует из таблицы наиболее вероятные значения коэффициентов концентрации упруго-пластических деформаций, определенные с учетом разгружающего эффекта от взаимного влияния канавок, лежат в пределах 5,7–8,2.

Температурное поле принималось изменяющимся по радиусу в соответствии с законом:

$$t_r = t(r_{\text{вн}}) + \Delta t_r \cdot \left( \frac{r - r_{\text{вн}}}{r_{\text{нар}} - r_{\text{вн}}} \right)^n, \quad (2)$$

где  $\Delta t_r = t_{r_{\text{нар}}} - t_{r_{\text{вн}}}$ ;

$t_{r_{\text{нар}}}$  – температура на внешнем радиусе диска  $r_{\text{нар}}$ ;

$t_{r_{\text{вн}}}$  – температура на внутреннем радиусе диска  $r_{\text{вн}}$ ;

$r$  – текущий радиус, на котором определяется температура.

Величина показателя степени  $n$  в уравнении (2) характеризует закон изменения температуры по радиусу и оказывает основное влияние на величину радиального градиента температуры. Продифференцировав обе части уравнения (2) по  $r$  получим:

$$\frac{dt(r)}{dr} = n \cdot \frac{\Delta t_r}{\Delta r} \cdot \left( \frac{r - r_{\text{вн}}}{r_{\text{нар}} - r_{\text{вн}}} \right)^{n-1}, \quad (3)$$

где  $\Delta r = r_{\text{нар}} - r_{\text{вн}}$ ;  $\frac{dt(r)}{dr}$  – радиальный градиент температур.

Положив в (3)  $r = r_{\text{нар}}$ , выразим  $n$  через радиальный градиент температур:

$$n = \frac{(dt/dr) \cdot r_{\text{нар}}}{\Delta t_r / \Delta r}. \quad (4)$$

На рисунке 2 приведены графики по результатам анализа влияния абсолютной величины радиального перепада температур и характера ее изменения по радиусу на величину коэффициентов концентрации осевых  $K_{\sigma_z}$ , окружных  $K_{\sigma_\theta}$  напряжений и интенсивности упруго-пластических деформаций  $K_{\varepsilon_i}$  в зоне терморазгрузочной канавки. Эти результаты были получены с помощью расчетов МКЭ для цилиндрического участка ротора, соответствующего думмису ротора СД с единичной терморазгрузочной канавкой.

Как следует из графиков на рисунке 2, коэффициент концентрации  $K_{\sigma_z} = \sigma_{z_{\text{max}}} / \sigma_{z_n}$  не зависит от перепада температур  $\Delta t_r$  и слабо зависит от показателя степени  $n$ , т.е. величина  $K_{\sigma_z}$  определяется, в основном, геометрией концентратора. Следовательно, полученное значение  $K_{\sigma_z}$  может быть использовано в расчетах различных реальных случаев при той же геометрии канавки, если отсутствует осевой градиент температуры (или является малым). Это позволяет использовать значения  $K_{\sigma_z}$ , определенные при одном из расчетных режимов, для определения  $\sigma_{z_{\text{max}}}$  при других режимах, ограничиваясь в этих случаях расчетом лишь номинальных напряжений с пересчетом  $K_{\sigma_z}$  в зависимости от  $n$ , определяемого по (4), и для других тепловых канавок на достаточном удалении от торцов и дисков.

При этом не учитывается влияние на  $K_{\sigma_z}$  и  $K_{\varepsilon_i}$  изменения осевого градиента температур, которое по выполненным оценкам невелико.

Величины  $K_{\varepsilon_i}$  существенно меняются с изменением как  $n$ , так и  $\Delta t_r$ .

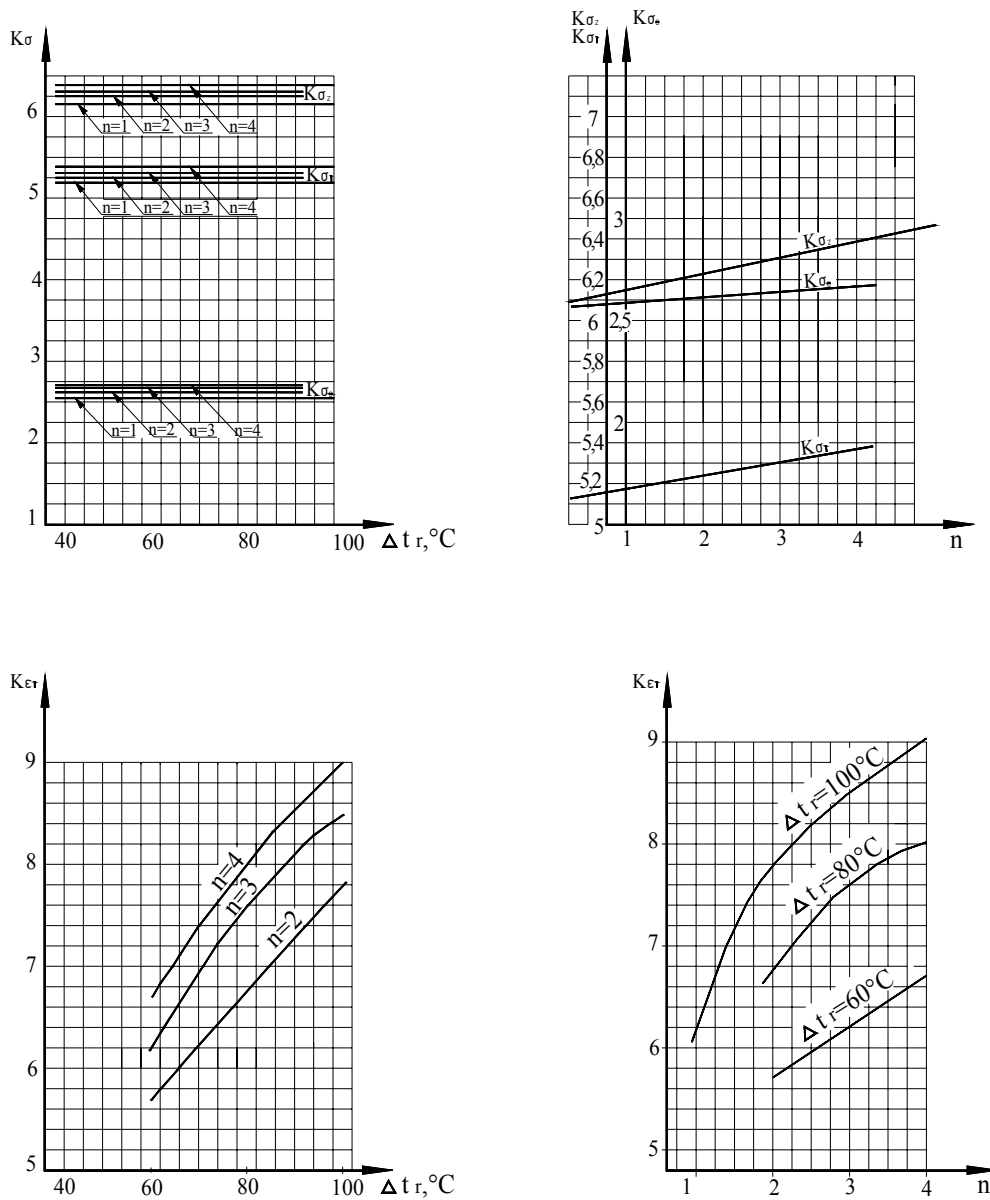


Рис. 2. Зависимости коэффициентов концентраций

На рисунках 3 и 4 показаны графики зависимости  $K_{\sigma_z}$  и  $K_{\epsilon_i}$  в средней канавке регулярной цепочки канавок бесконечного вала (имитирующего участки концевых уплотнений ротора) от относительного шага ( $\bar{l} = l/h$ ,  $l$  – расстояние между канавками,  $h$  – глубина канавки) между ними. Графики построены на основании проведенных МКЭ расчетов и могут использоваться для учета разгружающего взаимовлияния канавок, для чего найденные каким-либо способом (например, МКЭ) коэффициенты концентрации в одиночной канавке  $K_{\sigma_z}$  и  $K_{\epsilon_i}$  при конкретных режимах и размерах ротора следует умножить на отношение  $K_{\sigma_z}^*/K_{\sigma_z}^\infty$  ( $K_{\sigma_z}^*$  – при соответствующих величине относительного шага  $\bar{l}$  и количестве соседних канавок,  $K_{\sigma_z}^\infty$  – при одиночной канавке). Соответственно  $K_{\epsilon_i}$  умножается на отношение  $K_{\epsilon_i}^*/K_{\epsilon_i}^\infty$  ( $K_{\epsilon_i}^*$  – значение при

минимальном относительном шаге в группе канавок,  $K_{\varepsilon_z}^\infty$  – при максимальном относительном шаге, что равносильно одиночной канавке).

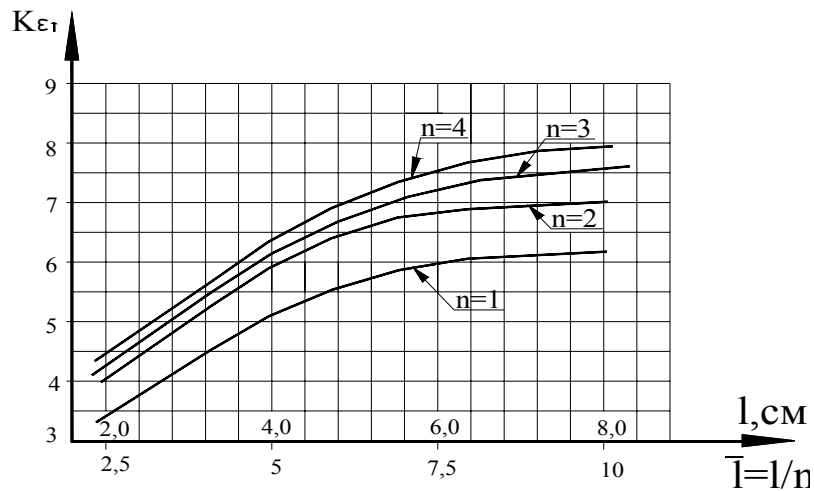


Рис. 3. Кривые коэффициентов концентрации интенсивностей упруго-пластических деформаций в зависимости от шага между канавками

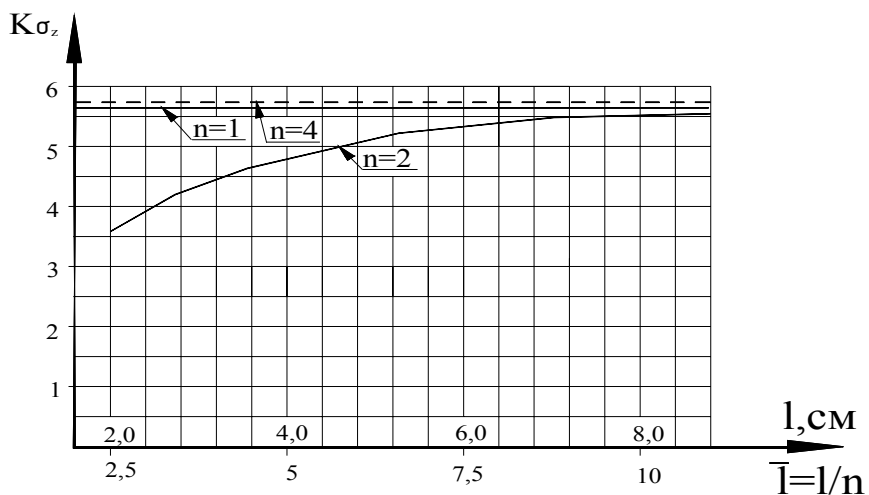


Рис. 4. Кривые коэффициентов концентрации осевых напряжений в зависимости от шага между канавками

На рисунке 5 приведено сопоставление  $K_{\sigma_z}$  в средней и крайней канавках на поверхности вала (при одномерном температурном поле), найденных по МКЭ (кривые 4 и 6), с помощью формул ВТИ (кривые 1 и 5) и по приближенным формулам (кривые 2 и 3).

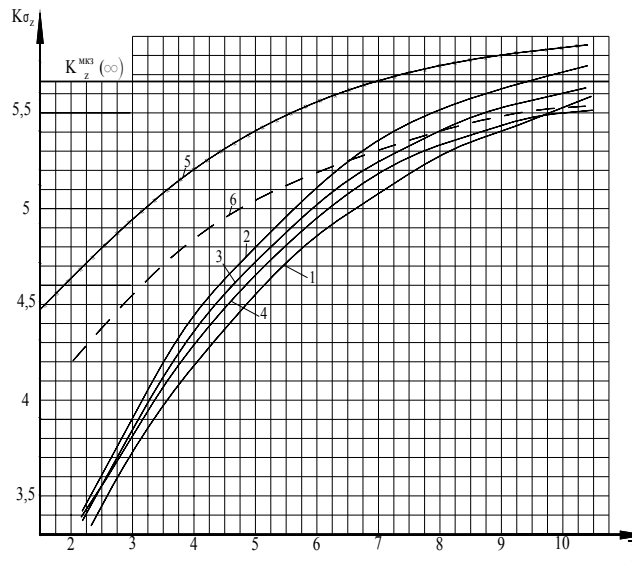


Рис. 5. Сравнение результатов расчета коэффициентов концентрации осевых напряжений по МКЭ с расчетами по приближенным формулам

### Выводы

Величины коэффициентов концентрации, определенные по приближенным формулам (кривые 2 и 3, рис. 5) и при решении осесимметричной задачи по МКЭ (кривые 4 и 6, рис. 5), отличаются при равнозначных условиях по геометрии в пределах (3–10) %. Это позволяет считать возможным использование в большинстве случаев, при определении коэффициентов концентрации, приближенных методов. Слишком большой диапазон между величинами коэффициентов концентрации для крайних и промежуточных канавок по методу ВТИ представляется нелогичным при сравнении с другими рассмотренными методами. В особо критических случаях имеет смысл использование результатов по расчетам МКЭ (кривая 6, рис. 5), как дающих наиболее консервативный результат.

**Список литературы:** 1. *Нейбер, Г.* Концентрация напряжений [Текст] / Г. Нейбер. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947.  
2. *Петерсон, Р.* Коэффициенты концентрации напряжений [Текст] / Р. Петерсон. – М.: Металлургиздат, 1962. – 488 с.

© Сухинин В.П., Пугачева Т.Н., 2012  
Поступила в редколлегию 15.02.12