



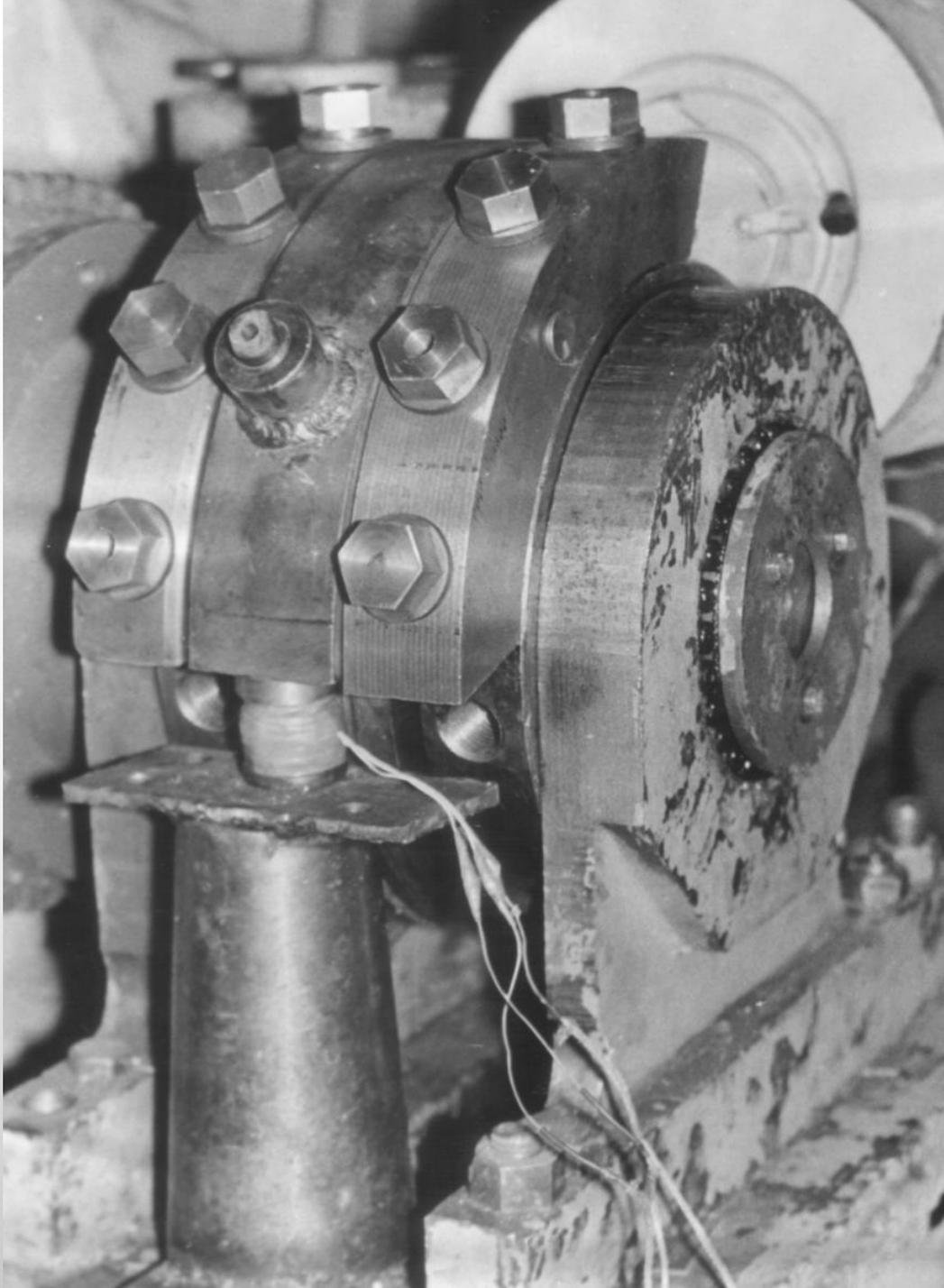
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт космических и информационных технологий

Кафедра «Систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования»

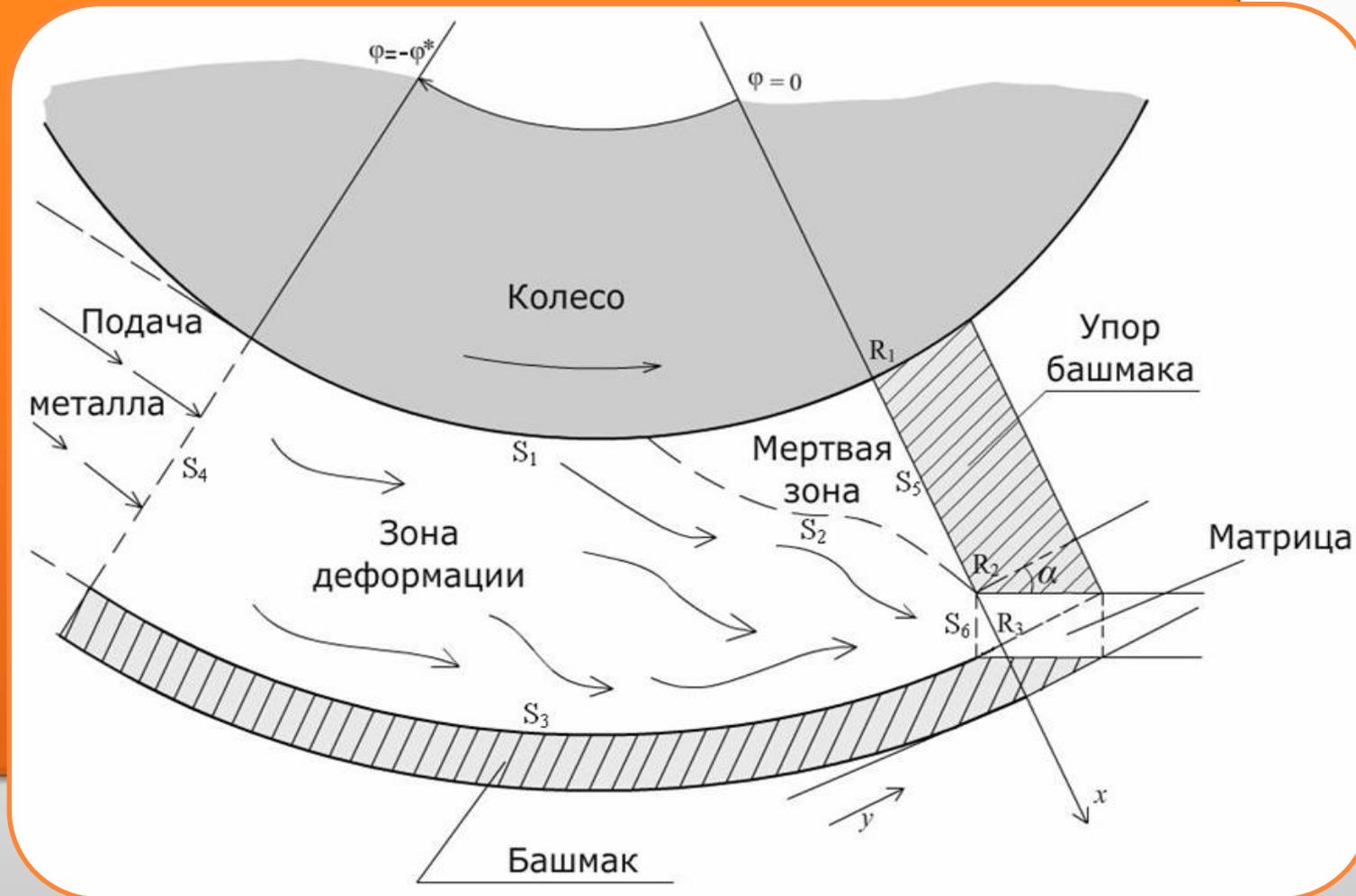
Математическое моделирование теплопереноса при непрерывном прессовании

А.Ш. Любанова
И.В. Солопко



УСТАНОВКА НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ СПОСОБОМ КОНФОРМ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ очага деформации



ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ МЕТОДОМ КОНФОРМ

- Любанова, А. Ш. Задача вязкопластической деформации металла / А. Ш. Любанова, Ф. Ю. Непомнящий // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – С. 327-332.
- Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография / Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, С. Б. Сидельников [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2009.
- Любанова, А. Ш. Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform / А. Ш. Любанова, Ю. В. Горохов, И. В. Солопко, А. Ю. Зиборов // Металлы. – 2010. – № 2. – С. 28-33.
- Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом Конформ / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Суслов [и др.] // Цветные металлы. – 2010. – № 12. – С. 69–71
- Расчет температуры полей деформационной зоны при непрерывном прессовании металлов методом Конформ. Горохов Ю.В., Осипов В.В., Солопко И.В., Катрюк В.П. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1 (37). С. 31-34.

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

- Процесс является установившимся;
- Металл - несжимаемая однородная вязкопластическая среда (бингамовская жидкость);
- Плоское течение.

ТЕПЛООБМЕН ИНСТРУМЕНТА С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Башмак – система охлаждения

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} \right) = 0, \quad T_1|_{r=R_4} = C_1, \quad \chi \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_4} = \alpha_2 (C_1 - T_{\text{охл}})$$

$$T_1(r) = \frac{\alpha_2 \cdot (C_1 - T_{\text{охл}}) \cdot R_4}{\chi_1} \cdot \ln \frac{R_4}{r} + C_1$$

Колесо – система охлаждения

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \right) = 0, \quad T_2|_{r=R_0} = C_2, \quad -\chi \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha_2 (C_2 - T_{\text{охл}})$$

$$T_2(r) = \frac{\alpha_2 \cdot (C_2 - T_{\text{охл}}) \cdot R_0}{\chi_1} \cdot \ln \frac{r}{R_0} + C_2$$

Упор башмака – система охлаждения

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} = 0, \quad T_3|_{y=y_1} = C_3, \quad \chi \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = \alpha_2 (C_3 - T_{\text{охл}})$$

$$T_3(y) = \frac{\alpha_2 \cdot (C_3 - T_{\text{охл}})}{\chi_1} \cdot (y_1 - y) + C_3$$

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ

$$c\rho\left(\frac{\partial\theta}{\partial r}v_r + \frac{\partial\theta}{\partial\varphi}v_\varphi\right) = \chi\left(\frac{\partial\theta}{\partial r}\frac{1}{r} + \frac{\partial^2\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial\varphi^2}\frac{1}{r^2}\right) + \left(2\mu + \frac{\tau_s}{|\tilde{D}|}\right)\left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + \frac{(r^2+1)}{4r^2}\left(\frac{\partial v_r}{\partial\varphi} - v_\varphi + r\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial\varphi} + v_r\right)^2\right],$$

θ - температура металла,

χ - коэффициент теплопроводности металла,

$\bar{v} = (v_r, v_\varphi)$ - скорость течения металла,

c - коэффициент теплоемкости,

ρ - плотность,

$|\tilde{D}|$ - модуль тензора скорости деформации.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

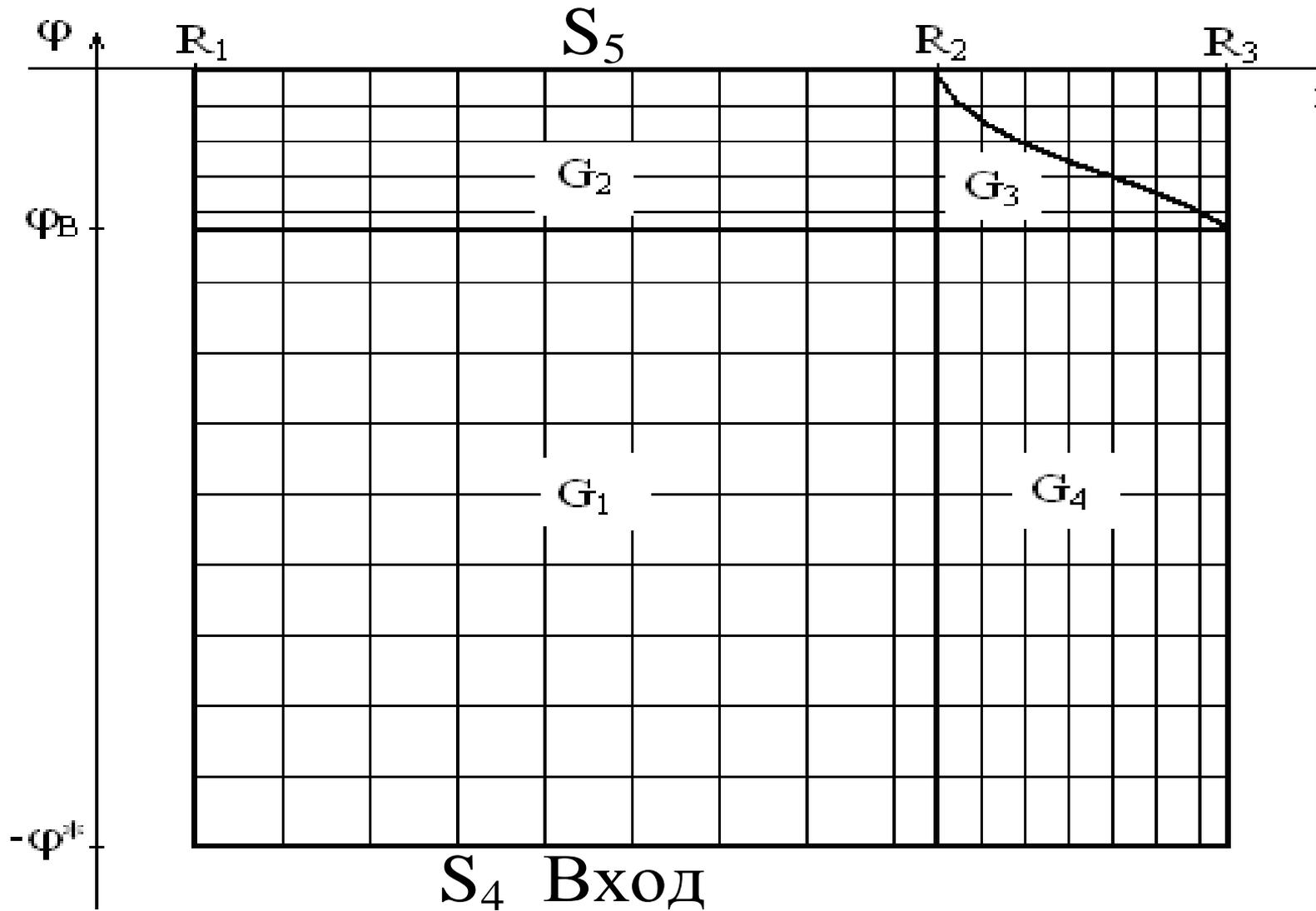
$$-\chi \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{S_1} = k(\theta - T) \Big|_{S_1},$$

$$\chi \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{S_3} = k(\theta - T) \Big|_{S_3},$$

$$\chi \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \Big|_{S_5} = k(\theta - T) \Big|_{S_5}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \Big|_{S_4} = 0,$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial r} \frac{\varphi_B}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + \varphi_B^2}} + \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{R_3 - R_2}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + \varphi_B^2}} \Big|_{S_6} = 0.$$

СЕТКА



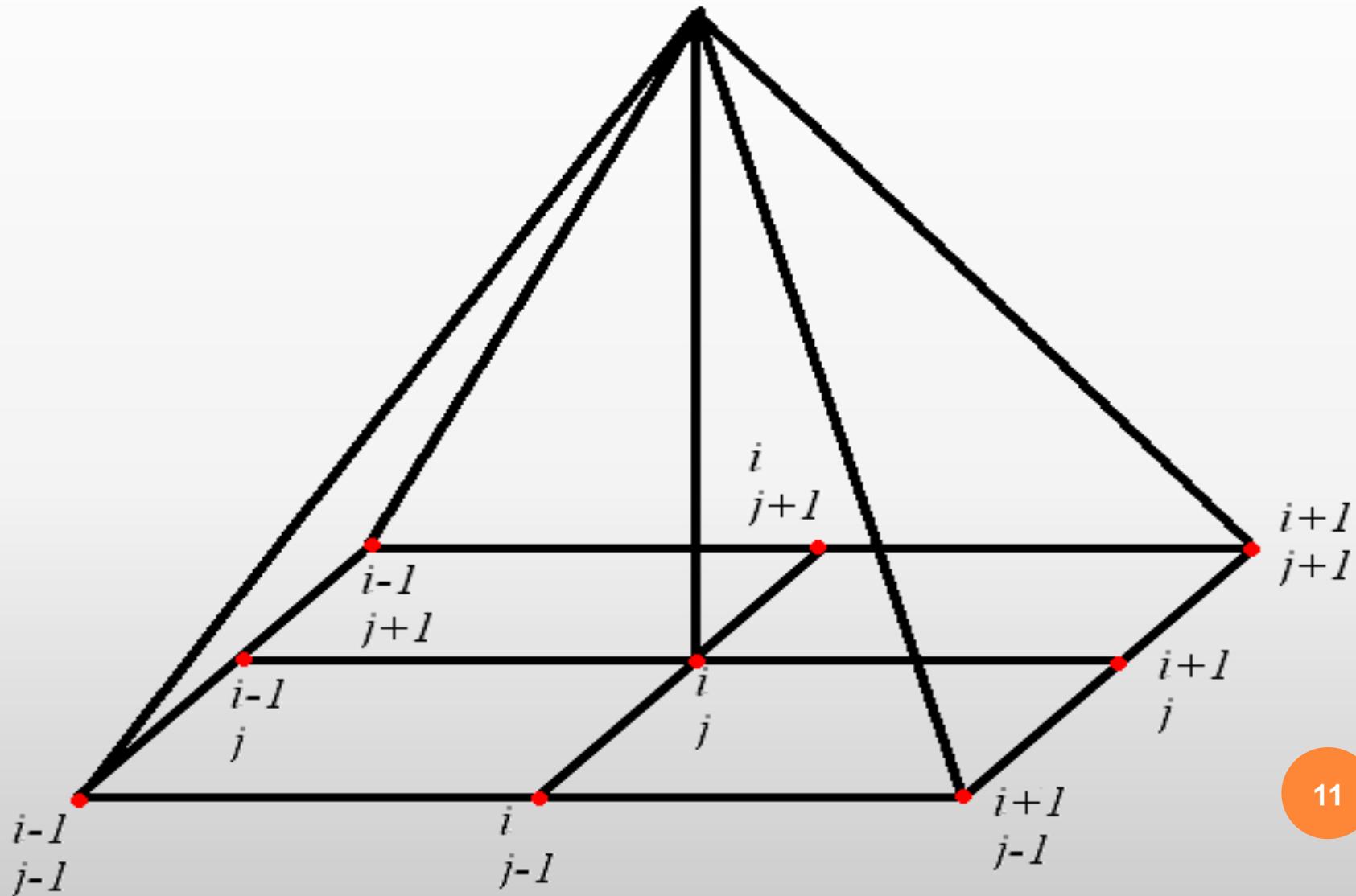
МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

$$\theta(\varphi, r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \theta_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r),$$

$$v_{\varphi} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad v_r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r),$$

где θ_{ij} , a_{ij} и b_{ij} узловые значения θ , v_{φ} , v_r соответственно, а $N_{ij}(\varphi, r)$ - линейные прямоугольные функции формы.

БАЗИСНЫЕ ФУНКЦИИ $N_{ij}(\varphi, r)$



БАЗИСНЫЕ ФУНКЦИИ

$$N_{i,j}(\varphi, r) = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{r - r_{j+1}}{r_{j+1} - r_j}, \quad r > \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} (r_{j+1} - r_j) + r_j, \\ \\ r > \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} (r_{j+1} - r_j) + r_j, \quad r \leq r_{j+1} \\ \\ -\frac{\varphi - \varphi_{j-1}}{\varphi_{j-1} - \varphi_j}, \quad r > \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} (r_{j-1} - r_j) + r_j, \\ \\ r \leq \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} (r_{j+1} - r_j) + r_j, \quad \varphi \geq \varphi_{i-1} \\ \\ -\frac{r - r_{j-1}}{r_{j-1} - r_j}, \quad r \leq \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} (r_{j-1} - r_j) + r_j, \\ \\ r \leq \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} (r_{j-1} - r_j) + r_j, \quad r \geq r_{j-1} \\ \\ -\frac{\varphi - \varphi_{j+1}}{\varphi_{j+1} - \varphi_j}, \quad r \leq \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} (r_{j+1} - r_j) + r_j, \\ \\ r > \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} (r_{j-1} - r_j) + r_j, \quad \varphi \leq \varphi_{i+1} \end{array} \right.$$

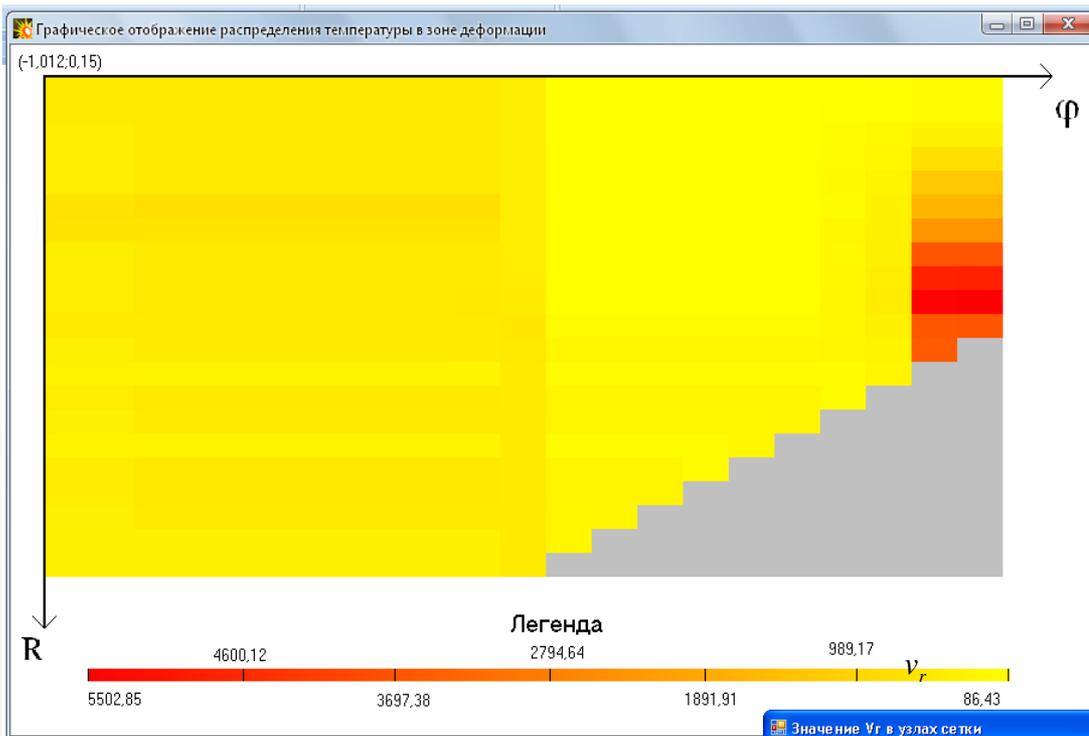
ДИСКРЕТНАЯ ЗАДАЧА

СВОДИТСЯ К НАХОЖДЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ $\theta_{i,j}$ В УЗЛАХ СЕТКИ ИЗ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{i-1,j} \theta_{i-1,j} + d_{i+1,j} \theta_{i+1,j} + d_{i,j} \theta_{i,j} + d_{i,j-1} \theta_{i,j-1} + d_{i,j+1} \theta_{i,j+1} = E_{i,j}, \\ i = 1, \dots, 2N-1, \quad j = 1, \dots, 2N-1, \quad i+j < 3N; \end{array} \right. \quad (1)$$

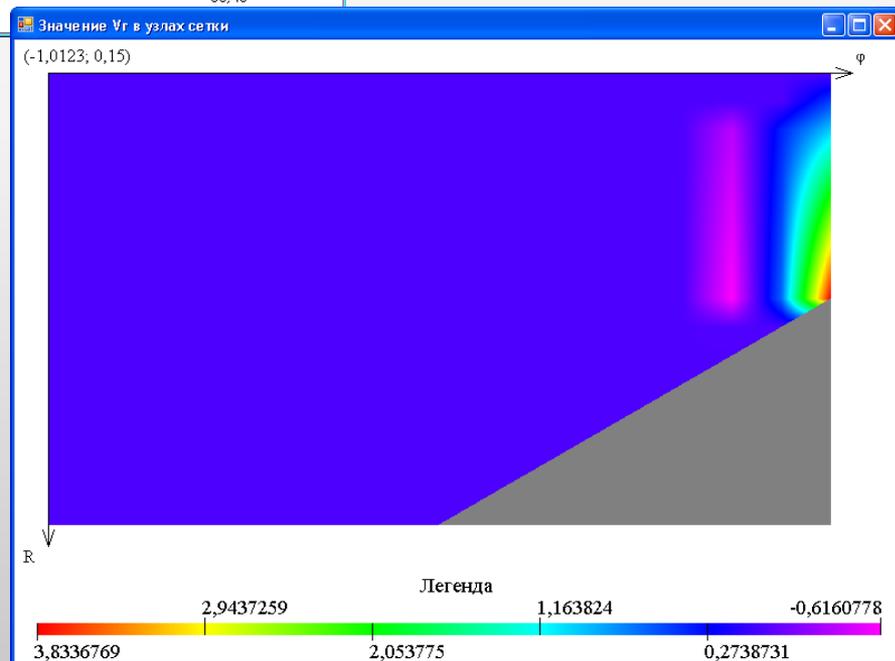
$$\left\{ \begin{array}{l} c_{1,j} \theta_{1,j} + c_{0,j} \theta_{0,j} = 0, \quad j = 0, \dots, 2N; \\ c_{2N,j} \theta_{2N,j} + c_{2N-1,j} \theta_{2N-1,j} = H_{2N,j}, \quad j = 1, \dots, N-1; \\ c_{i,1} \theta_{i,1} + c_{i,0} \theta_{i,0} = H_{i,0}, \quad i = 1, \dots, 2N; \\ c_{i,2N} \theta_{i,2N} + c_{i,2N-1} \theta_{i,2N-1} = H_{i,2N}, \quad i = 1, \dots, N; \\ c_{3N-i-1,i} \theta_{3N-i-1,i} + c_{3N-i,i} \theta_{3N-i,i} + c_{3N-i,i-1} \theta_{3N-i,i-1} = 0, \quad i = N+1, \dots, 2N; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$E_{i,j} = \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_{i+1}} \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} f(\varphi, r) N_{ij}(\varphi, r) d\varphi dr.$$



Распределение температуры θ (число разбиений 10, $\alpha=25^\circ$)

Распределение радиальной компоненты скорости V_r (число разбиений 10, $\alpha=25^\circ$)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена математическая модель и разработан алгоритм расчета распределения температуры в очаге пластической деформации способом Конформ.

Получена зависимость температуры на поверхности инструмента со стороны контакта с металлом от температуры хладагента.

В дальнейшем данная зависимость будет использована для исследования обратной задачи поддержания необходимого температурного режима в очаге деформации за счет регулирования температуры хладагента.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!