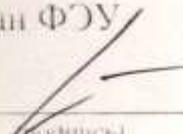


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

СОГЛАСОВАНО

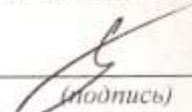
Декан ФГУ

  
\_\_\_\_\_ А.С. Гудим  
(подпись)

« 16 » 06 20 22 г.

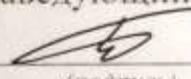
УТВЕРЖДАЮ

Начальник отдела ОНИПКРС

  
\_\_\_\_\_ В.В. Солецкий  
(подпись)

« 16 » 06 20 22 г.

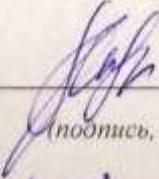
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_ М.С. Гринкруг  
(подпись)

« 16 » 06 20 22 г.

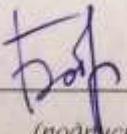
**Разработка программы топологической оптимизации штампов  
формообразования  
Комплект конструкторской документации**

Руководитель проекта

  
\_\_\_\_\_ 16.06.2022  
(подпись, дата)

И.К. Андрианов

Ответственный исполнитель

  
\_\_\_\_\_ 16.06.2022  
(подпись, дата)

Н.П. Бобровский

Комсомольск-на-Амуре 2022

### Карточка проекта

<b>Название</b>	<i>Разработка программы топологической оптимизации штампов формообразования</i>
<b>Тип проекта</b>	<i>учебная работа</i>
<b>Исполнители</b>	<i>Н.П. Бобровский - 1 Элб-1</i>
<b>Срок реализации</b>	<i>ноябрь 2021 – май 2022</i>

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

**ЗАДАНИЕ**  
**на разработку**

Название проекта: Разработка программы топологической оптимизации штампов формообразования

Заказчик: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Назначение: Использование штамповочных инструментов оптимизированной формы в области обработки металлов давлением

---

Область использования: обработка металлов давлением, изготовление пуансонов, матриц, реверсов оптимального объема

---

Функциональное описание программы: программа рассчитывает распределение пустот во внутренней области штампа с учетом длительности силового нагружения, прочностных характеристик, усталостных характеристик материала, конфигурации поверхности нагружения.

---

Техническое описание устройства: программный код написан с помощью математического пакета MathCad 15 и ANSYS 17, алгоритм расчета строится на основании итерационных процедур.

---

Требования: механические свойства материала штампа, геометрические характеристики штампа, условия силового нагружения

---

План работ:

Наименование работ	Срок
Анализ условий нагружения штампа в процессах формовки, вытяжки, обтяжки. Анализ усталостных характеристик материала штампа.	11.2021
Проведение математической постановки задачи оптимизации. Описание целевой функции минимизации податливости штампа при ограничениях на объем.	12.2021
Математическое моделирование процесса топологической оптимизации штампов с помощью нелинейной системы уравнений	02.2022
Разработка численных итерационных процедур, алгоритма для расчета пустот штампа при выполнении условий прочности	03.2022
Разработка программного кода и проведение численных экспериментов расчета напряженно-деформированного состояния штампа формообразования оптимального объема.	05.2022

Комментарии:

---

---

---

---

---

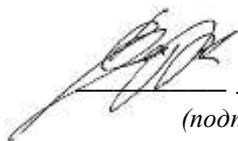
---

---

Перечень графического материала:

Блок-схема алгоритма, листинг программы расчета топологической оптимизации штампов формообразования

Руководитель проекта



16.02.2022

(подпись, дата)

И.К. Андрианов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

## ПАСПОРТ

проекта

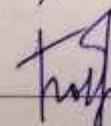
«Разработка программы топологической оптимизации штампов  
формообразования»

Руководитель проекта

  
\_\_\_\_\_ 16.06.2022  
(подпись, дата)

*И.К. Андрианов*

Ответственный исполнитель

  
\_\_\_\_\_ 16.06.2022  
(подпись, дата)

*Н.П. Бобровский*

Комсомольск-на-Амуре 2022

## Содержание

1	Общие положения .....	7
2	Назначение и принцип действия .....	8
2.1	Назначение изделия .....	8
2.2	Области использования изделия .....	8
2.3	Принцип действия.....	8
3	Состав изделия и комплектность.....	9
4	Разработка математической модели программы .....	10

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		6

## 1 Общие положения

Настоящий паспорт является документом, предназначенным для ознакомления с основными характеристиками программы проекта *«Разработка программы топологической оптимизации штампов формообразования»*

Паспорт входит в комплект поставки программы. Прежде, чем пользоваться программой, внимательно изучите назначение программы, область применения, математическую модель в основе программного кода. В связи с постоянной работой по усовершенствованию программы, повышающей ее надежность и улучшающей условия эксплуатации, могут быть внесены изменения, не отраженные в данном издании.

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
						7
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

## 2 Назначение и принцип действия

### 2.1 Назначение изделия

Программа предназначена для разработки штамповочных инструментов: пуансонов, матриц, реверсов - минимального объема из полимерных материалов в области штамповочного производства

В состав изделия входят: листинг и описание программы

### 2.2 Области использования изделия

Изделие может применяться в области листовой штамповки, при изготовлении тонкостенных изделий методами формообразования в автомобильном производстве и авиастроении.

### 2.3 Принцип действия

Программный комплекс включает в себя расчетные модули, каждый из которых обеспечивает решение отдельной подзадачи:

- Расчет напряжений и температуры в сплошном штампе с учетом стационарной нагрузки
- Расчет геометрических параметров удаляемых полостей на основании критериев усталостной долговечности и устойчивости
- Расчет минимального объема штампа при заданном количестве циклов нагружения

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		8

### 3 Состав изделия и комплектность

В комплект поставки входит:

- *Блок-схема, листинг*
- Паспорт.

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		9

#### 4 Разработка математической модели программы

Рассмотрим штамп формообразования с заданной поверхностью нагружения (рисунок 1). При оптимизации объема определим фиксированную область, которая остается неизменной: граничная поверхность штампа заданной толщины, где представлены условия нагружения и закрепления:

$$S = S_p + S_u + S_f,$$

где  $S_p = S_p^*$  - область с заданной поверхностной нагрузкой,

$S_u = S_u^*$  - область закрепления с ограничениями на перемещения,

$S_f = S_f^*$  - область оптимизации свободная от граничных условий.

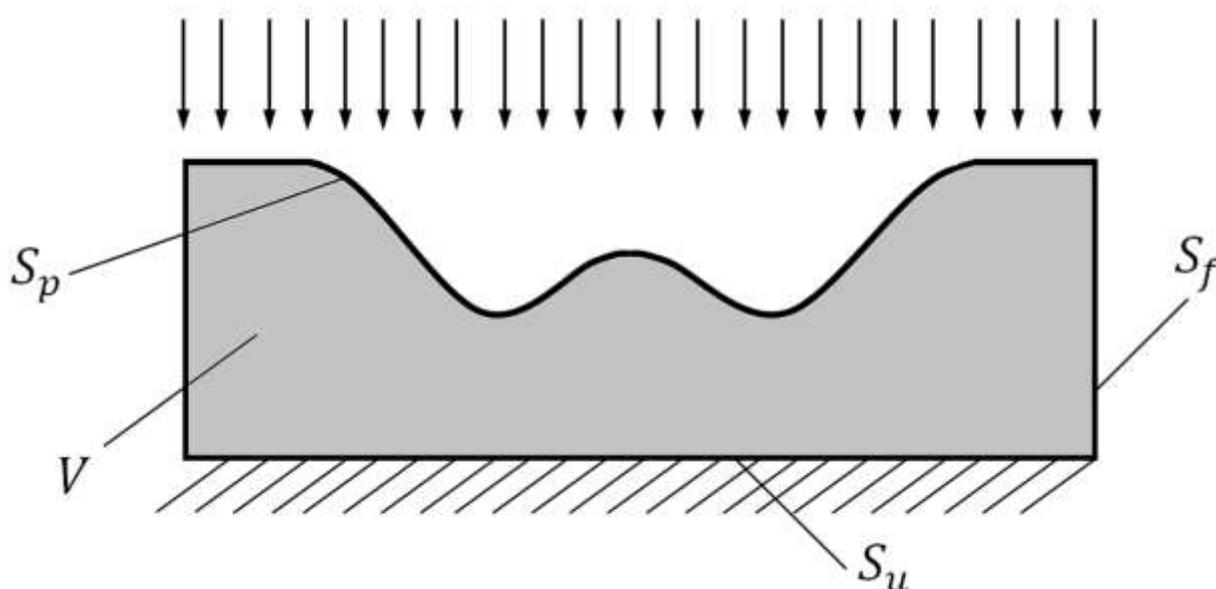


Рисунок 1 – Постановка задачи

Основная идея оптимизации заключается в выборе такого перераспределения материала, при котором состояние штампа приближается к предельному, но не превосходит его, что позволяет снизить материальные затраты. Таким образом, примем неизменной граничную область поверхности штампа, и рассмотрим в качестве целевой функции объем внутренней области штампа:

$$\min V = V_b + V_{in}^*,$$

где  $V$  – объем штампа,  $V_b$  – объем неизменяемой граничной области,  $V_{in}^*$  – объем внутренней оптимизируемой части штампа.

Построение математической модели перераспределения материала штампов при циклическом нагружении будем рассматривать на основании

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		10

двух подходов: с заданным распределением сохраняемых и удаляемых элементов, где на основании построенного «скелета» аппроксимации внутренней области оптимизации определяются конфигурация и геометрические характеристики стержневых элементов; с неизвестным распределением пустот, где в качестве целевой функции выступает податливость штампа при нагружении с ограничениями на усталостную долговечность

При длительном циклическом нагружении пластмасс вследствие механических потерь происходит тепловыделение в деформируемом материале, что обусловлено отставанием деформаций от приложенных механических напряжений. Данное явление может оказывать существенное влияние на усталостную долговечность полимера при большом количестве циклов нагружения. Таким образом, при длительном воздействии циклических нагрузок, повторяющихся с течением времени без теплоотведения, необходимо учитывать упругий гистерезис.

Определим объем полимерного штампа как целевую функцию. В случае представления оптимизируемой области с помощью стержневых структур, минимум целевой функции обеспечивается при минимальных геометрических характеристиках сечения стержней:

$$\min_{\Delta S} V = V_b + V_{in}^* |_{\Delta S \rightarrow \min}.$$

Рассмотрим воздействие на штамп периодической нагрузки вида

$$p(t) = p^* f_p(t),$$

$$f_p(t) = \frac{1}{2} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{t_c} t - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right).$$

При воздействии на образец напряжения с течением времени после некоторого числа циклов деформация будет изменяться по аналогичному закону с отставанием по времени на величину:

$$\Delta t = \frac{\varphi}{2\pi} t_c,$$

$$\text{при } \sigma(t) = \frac{p^* S_p}{n \Delta S}, f_p(t) = \frac{p^* S_p}{n \Delta S} \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{t_c} t - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{2} \right),$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и деформацией.

Для описания изменения деформации с течением времени представим вязкоупругую деформацию в виде:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t \frac{\sigma(t)}{E} \Pi(t) dt, \quad (1)$$

где  $\Pi(t)$  – ядро ползучести.

Подставим в уравнение (1) соотношение для нагрузки, тогда

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		11

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \frac{p^* S_p}{n \Delta S} \left[ f_p(t + \varphi) + \int_0^t f_p(t + \varphi) \Pi(\tau) d\tau \right]. \quad (2)$$

Плотность энергии, рассеянной за цикл нагружения, определяется площадью петли гистерезиса

$$W = \int_0^t \sigma d\varepsilon,$$

С учетом (2) представим плотность энергии в виде:

$$W = \frac{1}{E} \left( \frac{p^* S_p}{\Delta S} \right)^2 \int_0^t [f_p(t + \varphi) f_p(\tau) + f_p(\tau) f_p(t + \varphi) \Pi(\tau)] d\tau. \quad (3)$$

Приход тепловой энергии вследствие упругого гистерезиса в единицу времени определяется

$$Q_+ = \frac{V}{t} \int_0^t \sigma d\varepsilon. \quad (4)$$

Теплоотвод осуществляется на граничной поверхности элемента согласно условию теплоотдачи

$$Q_- = \alpha_g (T - T_g) S_f, \quad (5)$$

где  $S_f$  – площадь охлаждаемой поверхности элемента,  $T_g$  – температура охлаждающей среды,  $\alpha_g$  – коэффициент теплоотдачи.

С помощью соотношений (3) – (5) получим уравнение саморазогрева согласно условию теплового баланса

$$c \rho V_i \frac{\partial T}{\partial t} = Q_+ - Q_-. \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность полимера,  $c$  – удельная теплоемкость,  $V_i$  – объем элемента.

Согласно закону сохранения энергии уравнение теплопереноса (6) примет вид:

$$c \rho V_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{V_i}{t} \int_0^t \sigma d\varepsilon - \alpha_g (T_i - T_g) S_f, \quad (7)$$

С учетом изменения напряжений и деформаций с течением времени получим уравнение для изменения теплового состояния элемента:

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		12

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + \alpha_g(T_i - T_g) \frac{S_f}{c\rho V_i} - \frac{1}{t c \rho E} \left( \frac{p^* S_p}{n \Delta S} \right)^2 \int_0^t [\dot{f}_p(t + \varphi) f_p(t) + f_p(t) f_p(t + \varphi) \Pi(t)] dt = 0. \quad (8)$$

Решая дифференциальное уравнение (8), представим изменение теплового состояния элемента в следующем виде

$$T_i(t) = \frac{1}{c\rho E} \left( \frac{p^* S_p}{n \Delta S} \right)^2 e^{-\frac{\alpha_g S_f}{c\rho V_i} t} \int_0^t \left( \frac{1}{t} \int_0^t [\dot{f}_p(t + \varphi) f_p(t) + f_p(t) f_p(t + \varphi) \Pi(t)] dt \right) e^{\frac{\alpha_g S_f}{c\rho V_i} t} dt + T_0 e^{-\frac{\alpha_g S_f}{c\rho V_i} t}. \quad (9)$$

Тогда система уравнений примет вид

$$V_{\min} = V_b + \sum_{i=1}^n \Delta S_i^{\min} \Gamma(x_i), \quad (10)$$

$$\int_0^{N t_c} \frac{1}{\tau_0} e^{\frac{\gamma \sigma_i(t, \Delta S_{\min}) - U_0}{K T_i(t, \Delta S_{\min})}} dt = 1, \quad (11)$$

$$\min \Delta S_i = \Delta S_i |_{U_c = U_b}, \quad (12)$$

$$\sigma_i(t, \Delta S_{\min}) = \frac{p^* S_p}{n \Delta S_i^{\min}} f_p(t), \quad (13)$$

$$T_i(t, \Delta S_{\min}) = \frac{1}{c\rho E} \left( \frac{p^* S_p}{n \Delta S_{\min}} \right)^2 e^{-\frac{\alpha_g S_f}{c\rho V} t} \int_0^t \left( \frac{1}{t} \int_0^t [\dot{f}_p(t + \varphi) f_p(t) + f_p(t) f_p(t + \varphi) \Pi(t)] dt \right) e^{\frac{\alpha_g S_f}{c\rho V_i} t} dt + T_0 e^{-\frac{\alpha_g S_f}{c\rho V_i} t}. \quad (14)$$

Таким образом, математическая модель оптимизации топологии полимерных штампов с учетом саморазогрева описывается системой соотношений (11) – (14).

Система уравнений связывает количество циклов нагружения и минимальный объем штампа, при котором напряженное и тепловое состояния штампа удовлетворяют условию усталостной долговечности. Для решения

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
						13
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

системы уравнений и поиска оптимальных геометрических характеристик стержневых структур необходимы применение численных методов и разработка алгоритма решения.

Рассмотрим численное решение математической модели (11) - (14) оптимизации топологии штампа стержневыми элементами при заданном количестве циклов нагружения  $N^*$  и неизвестной геометрии стержневых элементов. При аппроксимации топологии штампа стержневыми структурами предельное состояние определяется согласно условию:

$$\int_0^{t_c} e^{\frac{\sigma_i f_p(t) \gamma}{KT}} dt = \frac{\tau_0}{N^*} e^{\frac{U_0}{KT}}, \quad (15)$$

Поскольку элемент имеет переменное сечение по высоте, предельное напряжение  $\sigma_i$ , удовлетворяющее условию (15), позволит рассчитать требуемую геометрию. Применяя квадратурную формулу трапеции, уравнение (15) примет вид

$$\sum_{j=1}^m \left( e^{\frac{\sigma_i \gamma f_p(t_{j-1})}{KT}} + e^{\frac{\sigma_i \gamma f_p(t_j)}{KT}} \right) - \frac{2}{\Delta t} \frac{\tau_0}{N^*} e^{\frac{U_0}{KT}} = 0, \quad (16)$$

Обозначим  $\psi(\sigma)$  левую часть уравнения (16) при фиксированном  $i = \text{const}$  для выбранного элемента:

$$\psi(\sigma) = \sum_{j=1}^m \left( e^{\frac{\sigma \gamma f_p(t_{j-1})}{KT}} + e^{\frac{\sigma \gamma f_p(t_j)}{KT}} \right) - \frac{2}{\Delta t} \frac{\tau_0}{N^*} e^{\frac{U_0}{KT}} \quad (17)$$

$$\psi'(\sigma) = \frac{\gamma}{KT} \sum_{j=1}^m \left( f_p(t_{j-1}) e^{\frac{\sigma \gamma f_p(t_{j-1})}{KT}} + f_p(t_j) e^{\frac{\sigma \gamma f_p(t_j)}{KT}} \right) \quad (18)$$

Единственность решения уравнения (16) обуславливается непрерывностью функции  $\psi(\sigma)$ , а также  $\psi'(\sigma) > 0$  ввиду положительности правой части выражения (18), где  $f_p(t_j) \geq 0$ .

Для численного решения уравнения (3.17) применим метод Ньютона-Рафсона:

$$\sigma^{(k+1)} = \sigma^{(k)} - \frac{\psi(\sigma^{(k)})}{\psi'(\sigma^{(k)})} \quad (19)$$

Подставляя в схему (19) выражения (18) получим итерационную схему расчета предельного напряжения в выбранном элементе штампа:

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		14

$$\sigma^{(k+1)} = \sigma^{(k)} - \left[ \sum_{j=1}^m \left( e^{\frac{\sigma^{(k)} \gamma f_p(t_{j-1})}{KT}} + e^{\frac{\sigma^{(k)} \gamma f_p(t_j)}{KT}} \right) - \frac{2}{\Delta t} \frac{\tau_0}{N^*} e^{\frac{U_0}{KT}} \right] \cdot \frac{KT}{\gamma} \left[ \sum_{j=1}^m \left( f_p(t_{j-1}) e^{\frac{\sigma^{(k)} \gamma f_p(t_{j-1})}{KT}} + f_p(t_j) e^{\frac{\sigma^{(k)} \gamma f_p(t_j)}{KT}} \right) \right]^{-1} \quad (20)$$

Для выбора начального приближения применим упрощенное условие:

$$\int \sigma f_p(t) dt = \sigma^* t, \\ \sigma f_p(t) = \sigma^*,$$

Тогда рассмотрим в качестве начального приближения действие постоянного напряжения

$$\int_0^{t_c} e^{\frac{\sigma^* \gamma}{KT}} dt = \frac{\tau_0}{N^*} e^{\frac{U_0}{KT}},$$

Учитывая, что  $\sigma^{(0)} = \sigma^*$ , получим начальное приближение:

$$\sigma^{(0)} = \frac{KT}{\gamma} \ln \left( \frac{\tau_0}{t_c N^*} \right) + \frac{U_0}{\gamma} \quad (21)$$

Согласно представленной итерационной схеме (20), (21) определяется напряжение в элементе, удовлетворяющее требуемому прочностному ресурсу.

Условие окончания итерационного процесса:

$$\left| \frac{\sigma^{(k+1)} - \sigma^{(k)}}{\sigma^{(k)}} \right| \leq \varepsilon$$

После определения предельного напряжения в стержневом элементе требуется определить геометрию элемента, удовлетворяющую условию устойчивости:

$$\frac{\pi^3 E}{2(\Gamma(x_i))^2} \int_0^{\Gamma(x_i)} R_i^4(z) dz + \frac{\pi^2 E}{\Gamma(x_i)} \int_0^{\Gamma(x_i)} R_i^3(z) \frac{\partial R_i(z)}{\partial z} \sin \left( \frac{2\pi z}{\Gamma(x_i)} \right) dz - \frac{2p^* S_p}{n} \Gamma(x_i) = 0, \quad (22)$$

где

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
						15
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

$$\frac{\partial R_i(z)}{\partial z} = 4 \left( \frac{\Gamma(x_i) - 2z}{(\Gamma(x_i))^2} \right) \left( \frac{p^* S_p}{n \pi \sigma_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{4z - 2\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} \right) \Delta x_{\min},$$

$$R_i(z) = 4 \left( \frac{z\Gamma(x_i) - z^2}{(\Gamma(x_i))^2} \right) \left( \frac{p^* S_p}{n \pi \sigma_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{2z^2 - 2z\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} + \frac{1}{2} \right) \Delta x_{\min}.$$

Уравнение (22) представляет собой нелинейное уравнение относительно неизвестного геометрического параметра  $\Delta x_{\min}$ . Для вычисления интегральных выражений применим квадратурную формулу трапеции. Построим вдоль координаты  $z$  по высоте каждого элемента при  $i = \text{const}$  сетку с шагом

$$\Delta z = z_j - z_{j-1} = \frac{\Gamma(x_i)}{m_z}$$

и узлами сетки

$$\{z_0; z_1, \dots, z_j; z_j + \Delta z, \dots, z_{m_z}\},$$

тогда уравнение (22) примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\pi^3 E}{2(\Gamma(x_i))^2} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m_z} (R_i^4(z_j) + R_i^4(z_{j-1})) \Delta z + \\ & + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 E}{\Gamma(x_i)} \sum_{j=1}^{m_z} \left[ R_i^3(z_j) \frac{\partial R_i(z_j)}{\partial z} \sin\left(\frac{2\pi z_j}{\Gamma(x_i)}\right) + R_i^3(z_{j-1}) \frac{\partial R_i(z_{j-1})}{\partial z} \sin\left(\frac{2\pi z_{j-1}}{\Gamma(x_i)}\right) \right] \Delta z \\ & - \frac{2p^* S_p}{n} \Gamma(x_i) = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

Для численного решения уравнения (23) относительно  $\Delta x_{\min}$  методом Ньютона-Рафсона обозначим левую часть уравнения в виде:

$$\phi(\Delta x_{\min}) = \sum_{j=1}^{m_z} [f(z_j; \Delta x_{\min}) + f(z_{j-1}; \Delta x_{\min})] \Delta z - \frac{2p^* S_p}{n} \Gamma(x_i)$$

где

$$f(z_j; \Delta x_{\min}) = \frac{\pi^3 E}{4(\Gamma(x_i))^2} R_i^4(z_j) + \frac{\pi^2 E}{2\Gamma(x_i)} R_i^3(z_j) \frac{\partial R_i(z_j)}{\partial z} \sin\left(\frac{2\pi z_j}{\Gamma(x_i)}\right)$$

$$R_i(z_j) = 4 \left( \frac{z\Gamma(x_i) - z^2}{(\Gamma(x_i))^2} \right) \left( \frac{p^* S_p}{n \pi \sigma_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{2z^2 - 2z\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} + \frac{1}{2} \right) \Delta x_{\min}. \quad (3.23a)$$

Итерационная схема согласно методу Ньютона-Рафсона определяется соотношением:

						СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.			16

$$\Delta x_{\min}^{(k+1)} = \Delta x_{\min}^{(k)} - \frac{\phi(\Delta x_{\min}^{(k)})}{\phi'(\Delta x_{\min}^{(k)})} \quad (24)$$

Для построения итерационного процесса требуется нахождение производных по искомому параметру  $\Delta x_{\min}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_i}{\partial(\Delta x_{\min})} &= \left( \frac{2z^2 - 2z\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} + \frac{1}{2} \right), \\ \frac{\partial}{\partial(\Delta x_{\min})} \left( \frac{\partial R_i}{\partial z} \right) &= \left( \frac{4z - 2\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} \right), \\ \frac{\partial}{\partial(\Delta x_{\min})} [\phi(\Delta x_{\min})] &= \sum_{j=1}^{m_z} [f'(z_j; \Delta x_{\min}) + f'(z_{j-1}; \Delta x_{\min})] \Delta z, \\ f'(z_j; \Delta x_{\min}) &= \frac{\partial}{\partial(\Delta x_{\min})} f(z_j; \Delta x_{\min}), \\ f'(z_j; \Delta x_{\min}) &= \left( \frac{2z_j^2 - 2z_j\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} + \frac{1}{2} \right) \left[ \frac{\pi^3 E}{(\Gamma(x_i))^2} R_i^3(z_j) + \right. \\ &+ \left. \frac{3\pi^2 E}{2\Gamma(x_i)} R_i^2(z_j) \frac{\partial R_i(z_j)}{\partial z} \sin\left(\frac{2\pi z_j}{\Gamma(x_i)}\right) \right] \\ &+ \frac{\pi^2 E}{2\Gamma(x_i)} R_i^3(z_j) \sin\left(\frac{2\pi z_j}{\Gamma(x_i)}\right) \left( \frac{4z_j - 2\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} \right). \end{aligned}$$

В результате представленных преобразований итерационная схема для расчета  $\Delta x_{\min}$  описывается соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta x_{\min}^{(k+1)} &= \Delta x_{\min}^{(k)} - \left( \sum_{j=1}^{m_z} [f(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) + f(z_{j-1}; \Delta x_{\min}^{(k)})] \Delta z - \frac{2p^* S_p}{n} \Gamma(x_i) \right) / \\ &/ \left( \sum_{j=1}^{m_z} [f'(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) + f'(z_{j-1}; \Delta x_{\min}^{(k)})] \Delta z \right) \quad (25) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} f'(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) &= \left( \frac{2z_j^2 - 2z_j\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} + \frac{1}{2} \right) \left[ \frac{\pi^3 E}{(\Gamma(x_i))^2} R_i^3(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) + \right. \\ &+ \left. \frac{3\pi^2 E}{2\Gamma(x_i)} R_i^2(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) R_i'(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) \sin\left(\frac{2\pi z_j}{\Gamma(x_i)}\right) \right] + \end{aligned}$$

					СКБФЭУ.2.ИП.01000033	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		17

$$\begin{aligned}
& + \frac{\pi^2 E}{2\Gamma(x_i)} R_i^3(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) \sin\left(\frac{2\pi z_j}{\Gamma(x_i)}\right) \left(\frac{4z_j - 2\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2}\right), \\
R'_i(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) &= 4 \left(\frac{\Gamma(x_i) - 2z}{(\Gamma(x_i))^2}\right) \left(\frac{p^* S_p}{n\pi\sigma_i}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{4z - 2\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2}\right) \Delta x_{\min}^{(k)}, \\
R_i(z_j; \Delta x_{\min}^{(k)}) &= 4 \left(\frac{z\Gamma(x_i) - z^2}{(\Gamma(x_i))^2}\right) \left(\frac{p^* S_p}{n\pi\sigma_i}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{2z^2 - 2z\Gamma(x_i)}{(\Gamma(x_i))^2} + \frac{1}{2}\right) \Delta x_{\min}^{(k)}.
\end{aligned}$$

В качестве начального приближения используется соотношение:

$$\Delta x_{\min}^{(0)} = L/n.$$

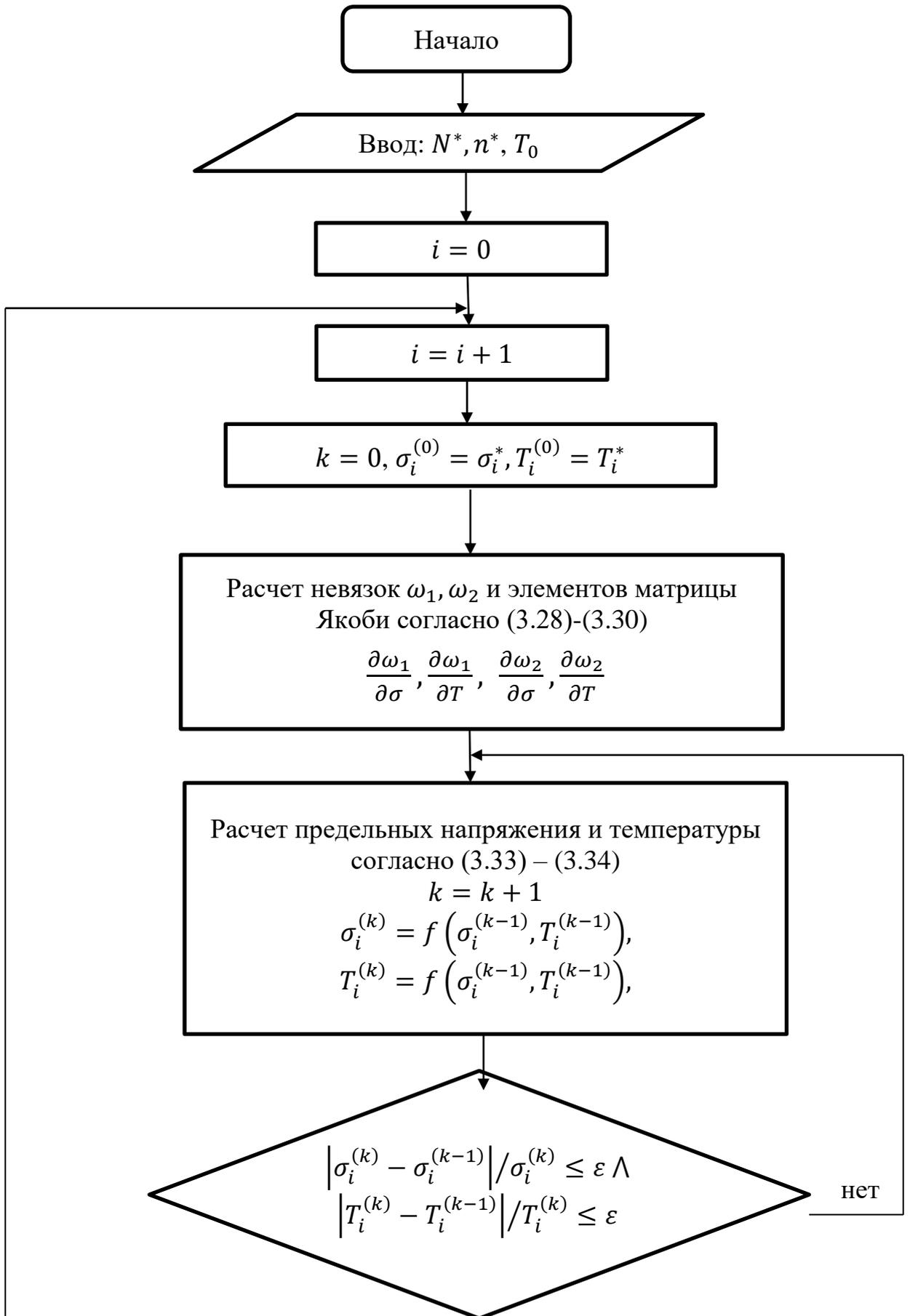
Условие окончания итерационного процесса:

$$\left| \frac{\Delta x_{\min}^{(k+1)} - \Delta x_{\min}^{(k)}}{\Delta x_{\min}^{(k)}} \right| \leq \varepsilon.$$

Предложенная численная методика расчета минимального объема при распределении стержневых элементов по объему штампа согласно (25) строится в соответствии с последовательностью шагов представленных на блок-схеме .

					<b>СКБФЭУ.2.ИП.01000033</b>	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		18

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

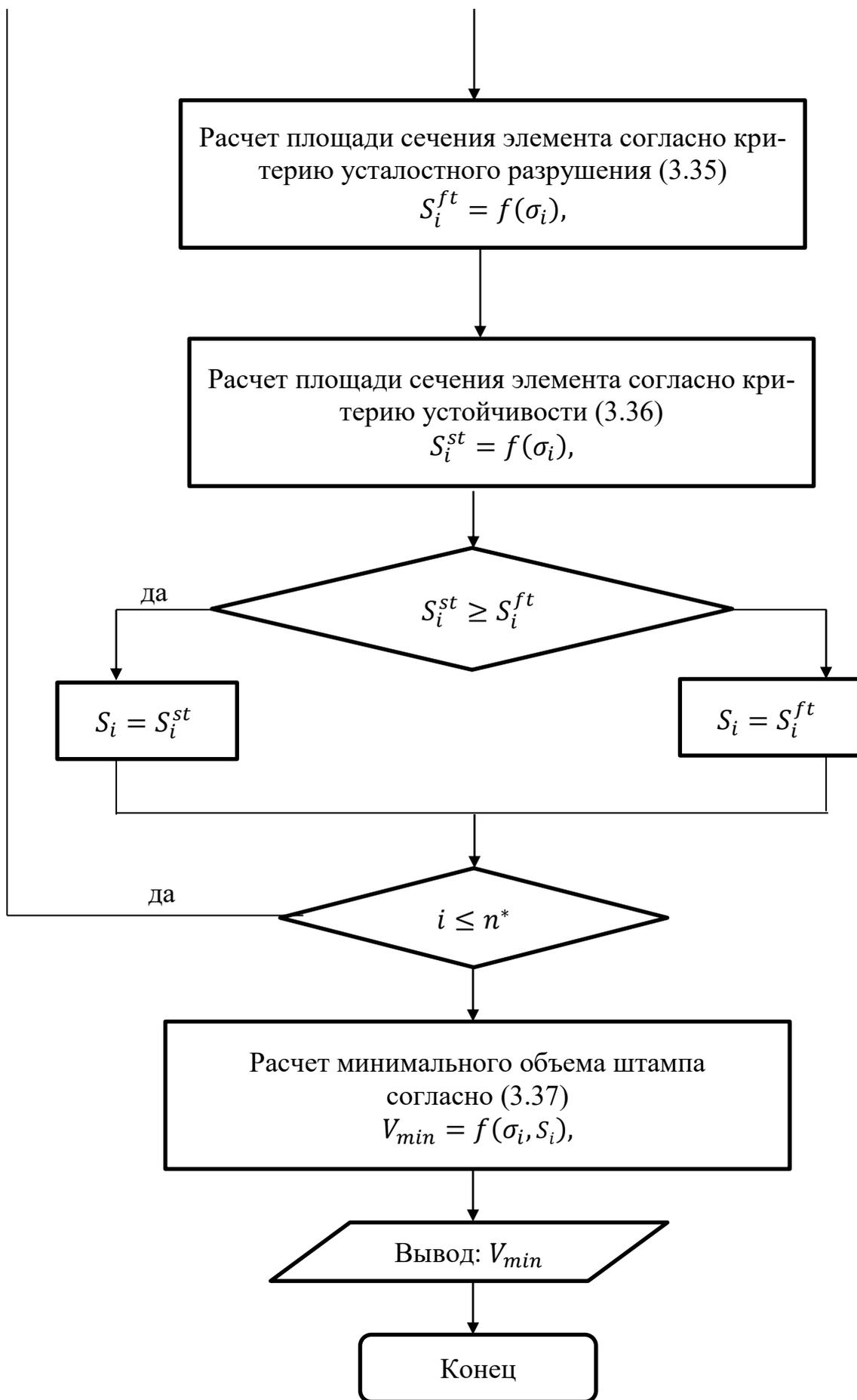


Изм.	Лист.	№ документа	Подп. Дата.

СКБФЭУ.2.ИП.01000033

Лист

19







## Листинг программы

```
*cfoopen,mylog,log
*cfclose
my_output, 'Begin Solution'


```

					СКБФЭУ.2.ИП.010000ЛП	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		23

```

j=0
curNode=0
*do,j,1,nNodes
    curNode = NDNEXT(curNode)
    *GET,Seqv_n,node,curNode,s,eqv
    Seqv_el=Seqv_el+Seqv_n/nNodes
*enddo
ElemData(i,2) = Seqv_el

*if,Seqv_el,GT,CriterionMaxValue,then
    CriterionMaxValue = Seqv_el
*endif
*enddo
allsel,all

my_output

*if,CriterionMaxValue,LT,17,then
    *exit
*endif

/prep7
*do,i,1,num
    curelem=ElemData(i,1)
    *if,ElemData(i,2),GT,10,then
        mp,ex,curelem,2e6-ElemData(i,2)*2
        emodif,curelem,mat,curelem
    *endif
*enddo
*enddo

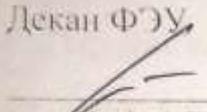
```

					СКБФЭУ.2.ИП.010000ЛП	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		24

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ

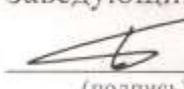
Декан ФЭУ

 А.С. Гудим  
(подпись)

« 16 » 06 20 22 г.

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

 М.С. Гринкруг  
(подпись)

« 16 » 06 20 22 г.

АКТ

о приемке в эксплуатацию проекта

«Разработка программы топологической оптимизации штампов  
формообразования»

г. Комсомольск-на-Амуре

«16» 06 2022 г.

Комиссия в составе представителей:

заказчика

- *И.К. Андрианов* – руководитель проекта,
- *М.С. Гринкруг* – Заведующий кафедрой «Общая физика»,
- *А.С. Гудим* – декана ФЭУ

исполнителя

- *И.П. Бобровский* – ИЭЛБ-1,

составила акт о нижеследующем:

«Исполнитель» передает комплект проекта «Разработка программы топологической оптимизации штампов формообразования», в составе:

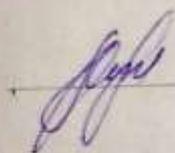
- Листинг программы и описание

Эксплуатационная документация:

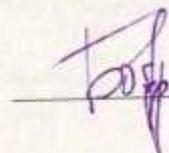
- Паспорт изделия

Проект «Разработка программы топологической оптимизации штампов формообразования» прошел опытную эксплуатацию с «16» 05 2022 по «30» 05 2022 г. и признан годным к эксплуатации. Были протестированы все режимы функционирования, отказы системы, а также аварийные отключения по вине системы не наблюдались.

Руководитель проекта

 / И.К. Андрианов /

Ответственный исполнитель

 / Н.П. Бобровский /

