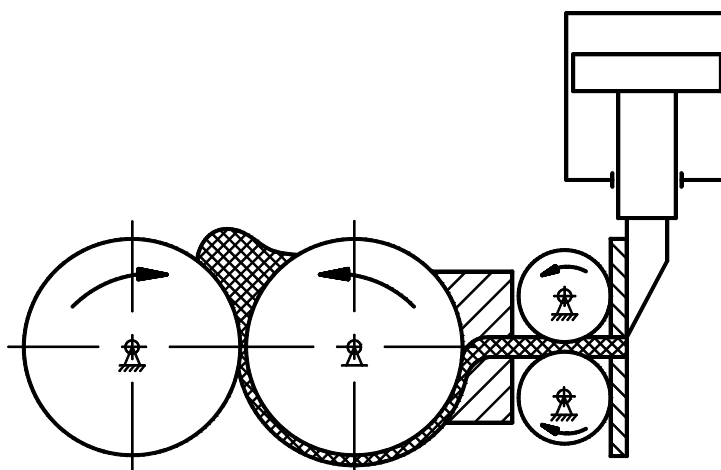


**А.С. КЛИНКОВ, М.В. СОКОЛОВ, В.И. КОЧЕТОВ,
П.С. БЕЛЯЕВ, В.Г. ОДНОЛЬКО**



**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАЛКОВЫХ
МАШИН ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**



**МОСКВА
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"
2005**

**А.С. КЛИНКОВ, М.В. СОКОЛОВ, В.И. КОЧЕТОВ,
П.С. БЕЛЯЕВ, В.Г. ОДНОЛЬКО**

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАЛКОВЫХ
МАШИН ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

МОСКВА
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"
2005

УДК 621.929.3
ББК Л71
А22

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой "Полимерсервис"
Московского государственного университета инженерной экологии

В.К. Скуратов

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
"Природопользование и защита окружающей среды"
Тамбовского государственного технического университета

Н.С. Попов

**Клинок А.С., Соколов М.В., Кочетов В.И.,
Беляев П.С., Однолько В.Г.**

А22 Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов. М.: "Издательство Машиностроение-1", 2005. 320 с.

Рассмотрены основные технологические и конструктивные аспекты проектирования валковых машин для переработки полимерных и других материалов, вопросы моделирования процесса пластикации на вальцах и каландрах. Приведены инженерные методики оптимального проектирования для решения задач минимизации массы рабочих органов при обеспечении условия прочности основных деталей и математическая модель процесса вальцевания полимерных

материалов по непрерывной схеме с учетом суммарного сдвига, соответствующего наилучшим физико-механическим показателям.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области переработки пластмасс и эластомеров.

УДК 621.929.3

ББК Л71

ISBN 5-94275-235-4

© Клинков А.С., Соколов М.В., Кочетов В.И.,
Беляев П.С., Однолько В.Г., 2005
© "Издательство Машиностроение-1", 2005

Научное издание

КЛИНКОВ Алексей Степанович,
СОКОЛОВ Михаил Владимирович,
КОЧЕТОВ Виктор Иванович,
БЕЛЯЕВ Павел Серафимович,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАЛКОВЫХ МАШИН
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Монография

Редактор Т.М. Глинкина
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкoвa

Подписано к печати 12.12.2005.

Формат 60 × 84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем: 18,6 усл. печ. л.; 18,0 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 876^М

«Издательство Машиностроение-1»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Для ускорения темпов развития производства и переработки пластмасс необходимо проведение в широких масштабах научно-исследовательских, проектно-конструкторских и опытных работ по созданию высокопроизводительных, экономичных процессов получения и переработки полимерных материалов и создание нового, более совершенного оборудования. Это относится и к валковым машинам, которые широко используются в производстве и переработке пластических масс и резиновых смесей. Поэтому вопросам экспериментального исследования, создания теорий переработки, методов расчета и усовершенствования конструкций валковых машин уделяется в настоящее время большое внимание. Благодаря комплексным исследованиям в области переработки полимерных материалов на валковых машинах были созданы достаточно надежные методы расчета основных параметров периодического и непрерывного процессов вальцевания и каландрования. Проведена значительная модернизация валковых машин, направленная на конструктивное усовершенствование и унификацию узлов машин, уменьшение веса и габаритов оборудования. Современные конструкции валковых машин имеют ряд вспомогательных устройств, повышающих производительность и степень механизации процесса, а также улучшающих качество готовой продукции. К таким устройствам можно отнести: механические устройства для подрезания и перемешивания массы; клиновые перемешивающие устройства; направляющие ролики, обеспечивающие возврат срезаемой ленты материала обратно в зазор валков; экструзионные отборочные устройства. Большое внимание уделяется разработке валковых машин непрерывного действия.

Базовым оборудованием для получения различных рулонных материалов, определяющим производительность линии и качество полученных изделий, являются валковые машины: вальцы и каландры [1]. Основными рабочими органами этих машин являются обогреваемые (охлаждаемые) валки, вращающиеся навстречу друг другу с одинаковыми или различными окружными скоростями, оси которых расположены в горизонтальной плоскости.

Валки, станины и другие несущие узлы валковой машины должны обладать достаточными прочностными характеристиками и выдерживать расчетные силовые нагрузки.

Распорные усилия, возникающие в межвалковом зазоре при деформации полимера, определяют нагрузки на валки, станины и другие элементы конструкций валковой машины. Величина нагрузок зависит от свойств и температуры перерабатываемой смеси. Несущие сечения станины вальцов имеют тавровую и двутавровую форму, каландров – чаще коробчатого или двутаврового сечения и ослаблены различными технологическими отверстиями под установку механизмов регулировки зазора. Станины вальцов замыкаются траверсами, воспринимающими часть нагрузки на станину и фиксирующими положение валковых подшипников.

Задача проводимых расчетов станин и валков заключается в определении напряжений и перемещений на стадии проектирования, анализе напряженно-деформированного состояния и выработке рекомендаций, позволяющих снизить металлоемкость за счет создания равнопрочной конструкции.

В монографии рассмотрены конструкции вальцов и каландров, методы расчета энергосиловых параметров процесса и порядок расчета наиболее нагруженных деталей: валков и станин вальцов и каландров.

В монографии проведен анализ современного состояния утилизации и вторичной переработки отходов полимерных материалов; показаны существующие технологии переработки отходов пленочных термопластов; разработан технологический процесс и валковое оборудование для вторичной переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов; создана экспериментальная валковая установка непрерывного действия по изучению процесса переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров; проведены исследования влияния технологических параметров процесса вальцевания (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, величины фрикции, величины "запаса" материала на валках) и конструктивных параметров оборудования (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, геометрических размеров фильеры) на свойства (показатель текучести расплава, предел прочности и относительное удлинение при разрыве) и производительность полу-

чаемого гранулята с целью выбора параметров управления; разработана математическая модель и программное обеспечение для расчета суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных технологических и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого гранулята; разработана методика инженерного расчета основных параметров непрерывного процесса вальцевания и конструкции валковых пластикаторов-грануляторов непрерывного действия с учетом заданного качества получаемого гранулята.

1. Анализ периодических процессов

обработки полимерных материалов

на валковых машинах

1.1. ОПИСАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВАЛЬЦЕВАНИЯ

Валковые машины являются одним из основных типов оборудования, применяющегося в производстве и переработке пластических масс и резиновых смесей. К валковым машинам относятся вальцы и каландры. Вальцы используют для проведения процессов смешения, гомогенизации компонентов смеси, пластикации, дробления, перетира и других технологических операций. Каландры применяются для получения листов и пленок (иногда с рисунком), для нанесения полимерного покрытия на тканевую или другую основу. По характеру взаимодействия обрабатываемого материала с валками процессы переработки полимерных материалов на вальцах и каландрах в значительной степени аналогичны. Обработка материала на валковых машинах в основном происходит в области деформации $ABCD$ (рис. 1.1).

В этой области обработка материала производится под действием сил, возникающих от соприкосновения обрабатываемого материала с поверхностью вращающихся валков. В области $ABCD$ на материал действуют растягивающие, сжимающие, сдвигающие силы, а также он подвергается действию статического электричества, возникающего от трения смеси о поверхность валков и повышенных температур. В результате этих воздействий обрабатываемый материал затягивается в

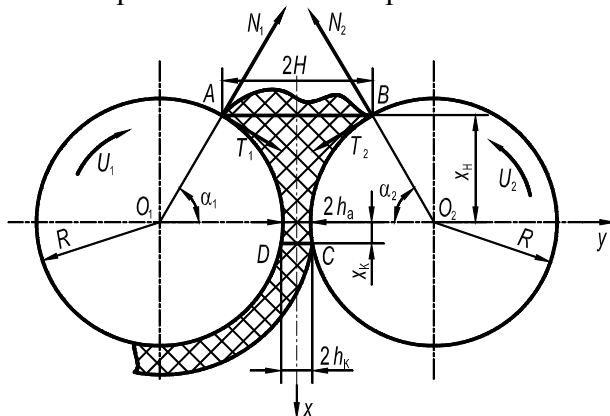


Рис. 1.1. Схема взаимодействия обрабатываемого материала с валками

постепенно сужающийся зазор, образованный двумя цилиндрическими валками. Необходимым условием затягивания смеси в пространство между валками является то, чтобы угол захвата (α_1 или α_2) был меньше или, по крайней мере, равен углу трения материала о поверхность валка.

Основными рабочими органами вальцов являются два полых цилиндрических валка, вращающихся навстречу друг другу с разными окружными скоростями, оси которых расположены в горизонтальной плоскости [2]. Основные технологические операции, проводимые на вальцах: смешение; пластикация; дробление; рафинирование смесей; промывка каучуков; подогрев смесей и др. Несмотря на многообразие проводимых технологических операций, конструктивно вальцы состоят из литой фундаментной плиты с ребрами жесткости, двух станин, которые сверху стянуты поперечинами, двух полых цилиндрических валков, неподвижных корпусов подшипников заднего валка и подвижных корпусов подшипников переднего валка, механизмов регулировки зазора, ограничительных стрелок, системы охлаждения

(нагрева) валков, системы смазки, аварийного и тормозного устройства. В соответствии с ГОСТ 14333–73 валцы обозначаются: например смесительные валцы с рабочей длиной 2130 мм и диаметром бочки валков 660 мм: СМ 2130 660/660П, буква "П" означает, что привод расположен справа.

На рис. 1.2 показаны валцы для пластикации и получения заготовок при производстве винипластовых листов, труб, ленты и др. На чугунной фундаментной плите 11 установлены две стальные станины 10 с траверсами, в которых установлены валки 9 с подшипниками 5.

Задняя пара валковых подшипников неподвижна, передняя пара может перемещаться в направляющих станины при помощи нажимных винтов, которые вращаются электродвигателями через червячные редукторы 1. Валки нагреваются перегретой водой до температуры 180 °С. Задний валок приводится во вращение через двухступенчатый коническо-цилиндрический редуктор 8 и пару приводных колес 4.

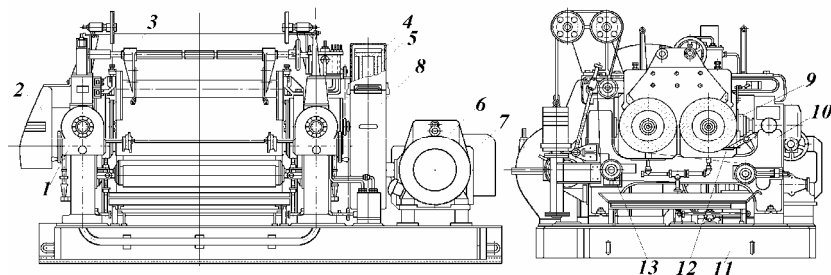


Рис. 1.2. Валцы для переработки пластических масс

Передний валок приводится во вращение через пару фрикционных шестерен 2 (фрикция 1,00; 1,17 и 1,27).

Асинхронный электродвигатель 7 соединен с редуктором упругой муфтой. Для остановки валцов служит колодочный тормоз 6. Корпуса подшипников стальные, в них запрессованы втулки из бронзы. Зазор между шейкой валка и вкладышем несколько увеличен из-за повышенной температуры переработки. Система смазки подшипников циркуляционная.

Валцы снабжены вспомогательными устройствами: приспособлениями для возврата массы в зазор валков и скатывания вальцуемого материала в рулон, ножом для подрезания кромок, передвижными ограничительными стрелами 3. Просыпающаяся (через зазор между валками) во время загрузки порошкообразная масса возвращается в рабочий зазор валцов фартуком (ленточным транспортером) 13, который облегчает обслуживание машины и снижает количество отходов.

Пластицируемые и смешиваемые материалы несколько раз пропускаются через зазор валцов для получения однородной массы. Выходящая с валцов масса свертывается в рулон валиком, прижимаемым к образующей переднего валка. Для съема материала при изготовлении ленты применяют устройство 12 с двумя дисковыми ножами, установленными на передвижных каретках. Каретка с ножами при помощи ходового винта совершает возвратно-поступательное движение вдоль образующей валка. При этом срезается лента необходимой ширины.

Принципиальная конструкция каландров во многом подобна конструкции валцов.

На рис. 1.3 показан разрез четырехвалкового Г-образного каландра. Станина представляет собой две рамы 5 замкнутого контура, имеющие Г-образные отверстия, в которых расположены корпуса подшипников валков.

Подшипники среднего валка 2 укреплены на станине неподвижно. Подшипники верхнего 4 и нижнего 1 валков могут перемещаться в вертикальном направлении с помощью механизмов 6 и 11.

Подшипники выносного валка 7 перемещаются в горизонтальном направлении механизмами 9.

Привод валков также осуществляется от электродвигателя через редуктор и установленные на валках зубчатые пары.

В последнее время получили распространение каландры, у которых каждый валок соединен карданным валом с одним из выходных валов специального редуктора.

Все вспомогательные механизмы монтируются на рамах станины. На рис. 1.3 показаны питающее устройство 8, прижимной валик 10 и направляющие валки 3.

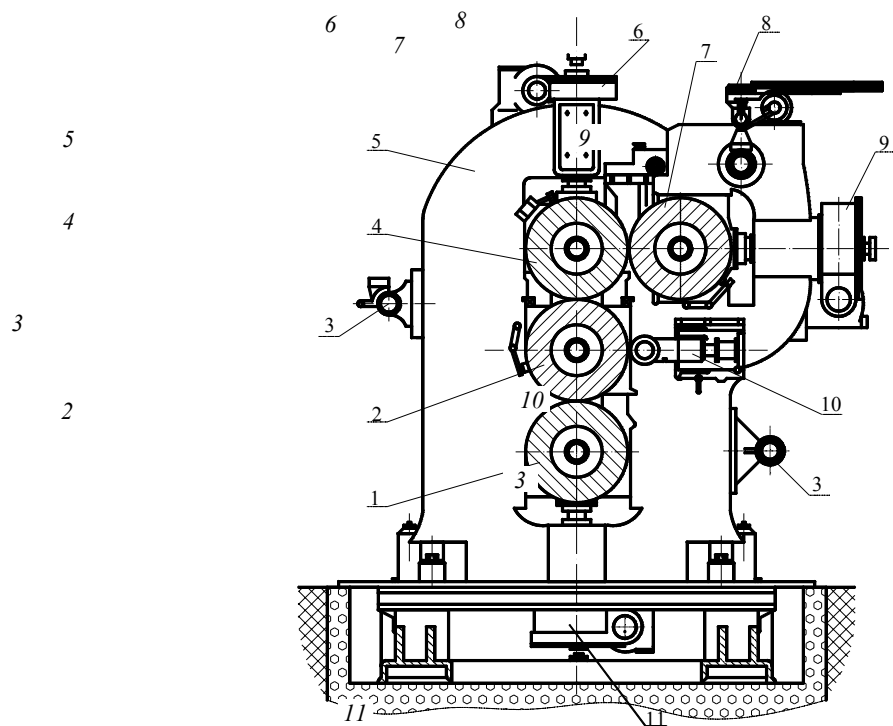


Рис. 1.3. Четырехвалковый Г-образный каландр

Основными задачами теоретических исследований в области переработки пластических масс и резиновых смесей на валковом оборудовании являются:

1) создание математических моделей процессов периодического и непрерывного вальцевания с целью расчета силовых и энергетических параметров;

2) исследование влияния технологических параметров процесса вальцевания (как периодического, так и непрерывного) на качество получаемого продукта с целью достижения оптимальных режимов работы валковых машин.

Полный математический анализ позволит решить следующие задачи: исходя из физических свойств перерабатываемого материала, геометрических размеров валков, скорости их вращения, зазора между ними и величины запаса материала на валках можно рассчитать производительность оборудования, распорные усилия между валками, мощность, необходимую для привода машины, толщину получаемого листа или пленки и распределение температурного поля в зоне деформации.

К настоящему времени оформилось три группы методов математического описания периодического процесса обработки полимерных материалов на валковых машинах. К первой группе относится метод, базирующийся на выводе эмпирических зависимостей, полученных обработкой экспериментальных данных с помощью теории подобия и анализа размерностей и уравнений [1, 2]. Используя этот метод, Н.А. Козулин, Н.И. Таганов и М.Ф. Михалев вывели эмпирические зависимости для определения распорного усилия и мощности привода валцов:

$$F_n = k_1 \rho D^{x_1} \left(\frac{2h_k}{D} \right)^{y_1} \left(\frac{b}{D} \right)^{z_1} \left(\frac{d}{D} \right)^{u_1} A^{v_1}; \quad (1.1)$$

$$N_n = k_2 \rho D^{x_2} f^{w_2} \left(\frac{2h_k}{D} \right)^{y_2} \left(\frac{b}{D} \right)^{z_2} \left(\frac{d}{D} \right)^{u_2} A^{v_2}, \quad (1.2)$$

где $\frac{d}{D}$ – геометрический симплекс, масштабный коэффициент при переходе от экспериментальных валцов (диаметр d) к проектируемым (диаметр D); $x_1, y_1, z_1, u_1, v_1, x_2, y_2, z_2, u_2, v_2$ – коэффициенты, находятся на основании экспериментов; A – физический параметр готовой массы – восстанавливаемость, плотность, пластичность и т.д.; D – диаметр бочки валка; ρ – плотность смеси; $2h_k$ – толщина вальцуемого материала при выходе из зоны деформации; $f = \frac{n_2}{n_1}$ – фрикция между валками; n_1, n_2 – скорости

вращения переднего и заднего валков соответственно; b – ширина вальцуемого листа; k_1, k_2 – коэффициенты.

К достоинствам данного метода следует отнести то, что он выявляет непосредственную связь между распорным усилием F_n , мощностью N_n и физическими параметрами вальцуемой массы. К недостаткам можно отнести то, что данные критериальные уравнения не раскрывают физической картины процесса в зоне деформации $ABCD$. Ценность метода снижается за счет того, что для каждого обрабатываемого материала и для каждого изменения технологического параметра процесса вальцевания необходимо проводить эксперимент, что практически не всегда возможно. Ко второй группе относятся методы, построенные на предположении, что полимерные материалы являются веществами, обладающими ярко выраженным пределом текучести, а сам процесс деформации вальцуемой массы аналогичен прокатке металла. Наиболее полное решение данной задачи получено в работе [3]. На основании данного предположения М.М. Майзелем использовано дифференциальное уравнение равновесия элемента в зоне деформации для полимера, которое после преобразования имеет вид

$$\frac{d(P - \chi\sigma_t)}{dy} - \frac{\chi\sigma_t}{x} \frac{dx}{dy} \pm \frac{\tau}{x} = 0.$$

Для решения данного уравнения приняты следующие граничные условия:

$$\sigma_{y=0} = 0; \quad \sigma_{y=y_n} = 0;$$

(1.3)

$$P_{y=0} = \chi\sigma_t; \quad P_{y=y_n} = \chi\sigma_t.$$

Предполагается, что сила трения определяется законом Амонтона

$$\tau = f_1 P. \quad (1.4)$$

В этих формулах σ_t – предел текучести; P – удельное давление; χ – коэффициент изменяется в пределах $1 < \chi < 1,25$; f_1 – коэффициент трения полимера о поверхность валка; τ – напряжение сдвига; x, y – текущие координаты.

Разрешая уравнение (1.3) относительно P , получаем распределение удельного давления по дуге захвата материала:

- для зоны отставания

$$P = \frac{\chi\sigma_t}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_n}{h} \right)^\delta + 1 \right]; \quad (1.5)$$

- для зоны опережения

$$P = \frac{\chi\sigma_t}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h}{h_k} \right)^\delta - 1 \right], \quad (1.6)$$

где $\delta = \frac{2f_1 y}{h_n - h_k}$.

Под зоной отставания подразумевается область деформации обрабатываемого материала, где удельное давление на материал достигает максимального значения. Зона опережения, соответственно, находится между нейтральным и сечением выхода материала с валков. Анализ уравнений (1.5) и (1.6) показывает, что в зоне отставания удельное давление возрастает в сторону уменьшения зазора, а в зоне опережения, наоборот, уменьшается. Следовательно, на границе раздела между зоной отставания и зоной опережения (нейтральное сечение) величина удельного давления достигает максимального значения. Далее, просуммировав проекции элементарных сил давления и сил трения на плоскость осей валков, определяется величина распорного усилия

$$F_n = \frac{2L\chi\sigma_t h_{н.с}}{\delta - 1} \sqrt{\frac{2R}{h_n - h_k} \left[\left(\frac{h_{н.с}}{h_k} \right)^\delta - 1 \right]}, \quad (1.7)$$

где L – рабочая длина валка; R – радиус бочки валка.

Уравнение (1.7) получено в предположении, что удельное давление постоянно по ширине вальцуемого материала, дуга захвата заменена хордой и составляющая от сил трения не учитывается. Для

случая, когда скорость вращения и диаметры валков равны, а ордината точки приложения равнодействующей силы распора известна, определяется момент сопротивления, возникающий при деформации материала между вращающимися валками

$$M = F_n D \sin \beta, \quad (1.8)$$

где β – угол, определяющий величину ординаты точки приложения равнодействующей распорного усилия.

Анализ уравнений (1.7) и (1.8) показывает, что момент сопротивления зависит от предела текучести перерабатываемого материала, коэффициента трения и геометрических размеров, определяющих зону деформации, и не зависит от скорости деформации. Очевидно, этот метод не может удовлетворительно объяснить физическую сущность процесса вальцевания и каландрования полимерных материалов, так как не учитывает особенностей процесса их деформации и течения. Поэтому данный метод находит ограниченное применение при инженерных расчетах валкового оборудования.

К третьей группе описания процессов вальцевания и каландрования относится теория, в основе которой лежит представление о том, что полимерные материалы в процессе переработки ведут себя как жидкости, процесс течения которых может быть описан уравнениями гидромеханики. Эта теория получила название гидромеханической. В настоящее время опубликовано значительное количество гидромеханических методов описания процессов периодического вальцевания полимерных материалов [4 – 9]. Все разработанные до настоящего времени гидромеханические методы расчета основных параметров процесса периодического вальцевания основаны на приближенном решении задачи ламинарного течения несжимаемой вязкой или вязкоупругой жидкости между двумя вращающимися цилиндрическими валками. В общем случае гидромеханическая задача течения вязкой или вязкоупругой несжимаемой жидкости сводится к решению четырех дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных, уравнения движения жидкости, уравнения неразрывности потока, уравнения энергии и реологического уравнения. Так как считаем, что в процессе обработки полимера на валковых машинах материал не изменяет своего агрегатного состояния, то уравнение, учитывающее его изменение, не составляется.

Несмотря на сравнительно большое количество гидромеханических методов, описывающих процесс обработки полимерного материала на валковом оборудовании, общими допущениями, принимаемыми в них для упрощения задачи, являются следующие:

- 1) движение жидкости считается установившимся и плоскопараллельным;
- 2) скорость движения материала в направлении оси x значительно превосходит скорость движения в направлении оси y ;
- 3) материал принимается несжимаемым, и возникающие касательные напряжения значительно превосходят нормальные;
- 4) движение жидкости принимается изотермическим, следовательно, уравнение энергии не рассматривается;
- 5) массовыми силами, ввиду их малости, пренебрегаем.

Основным отличием одного гидромеханического метода от другого является принятие различных реологических уравнений, описывающих поведение материала при деформировании, и различных граничных условий проведения процесса. Все гидромеханические методы по расчету основных параметров процессов обработки полимерных материалов на валковых машинах можно подразделить на четыре группы:

- 1) симметричного процесса вальцевания и каландрования ньютоновских и неньютоновских жидкостей [4, 6];
- 2) несимметричного процесса вальцевания и каландрования ньютоновских и неньютоновских жидкостей в изотермическом режиме [5];
- 3) основных параметров процесса вальцевания вязкоупругих жидкостей [9];
- 4) основных параметров процесса вальцевания и каландрования полимерных материалов в неизотермическом режиме [17, 22].

1.2.
симметричного

Гидромеханический
процесса

метод
вальцевания

расчета
и

Анализ изотермического течения несжимаемой ньютоновской жидкости между двумя цилиндрическими валками проведен в работах [8]. Задача заключается в определении давления, компоненты вектора скорости частиц потока ϑ_x и ϑ_y – в функции от координат x и y , распорного усилия и технологической мощности.

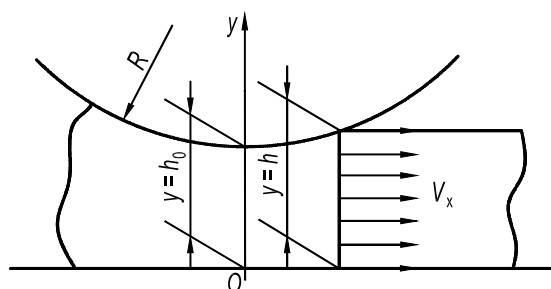


Рис. 1.4. Схема обозначений параметров вальцевания

Анализ движения материала проводится в прямоугольной системе координат, оси которой ориентированы, как показано на рис. 1.4.

Вследствие условия несжимаемости уравнение неразрывности записывается в виде

$$\frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} = \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y}. \quad (1.9)$$

Уравнение движения материала – в форме уравнения Стокса

$$\rho \left[\vartheta_x \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} \right) + \vartheta_y \left(\frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} \right) \right] = - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \mu \left[\frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial y^2} \right) \right]. \quad (1.10)$$

С учетом допущений, описанных выше, уравнение (1.10) примет вид

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial y^2}. \quad (1.11)$$

Интегрируя (1.11), получим

$$\gamma = \frac{d\vartheta_x}{dy} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) y + C_1. \quad (1.12)$$

Постоянная интегрирования C_1 находится из условия $\dot{\gamma}(0) = 0$ вследствие симметричности потока относительно оси x . При этом $C_1 = 0$. Интегрируя (1.12), получим

$$\vartheta_x = U + \frac{y^2 - h^2}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) + C_2, \quad (1.13)$$

где U – окружная скорость валка; h – расстояние от плоскости симметрии до поверхности валка.

Постоянная интегрирования C_2 определяется из условия прилипания материала к поверхности валка

$$\vartheta_x(h) = \vartheta_x(-h) = U,$$

тогда

$$\vartheta_x = U + \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (y^2 - h^2). \quad (1.14)$$

Расход потока через зазор, отнесенный к единице ширины валка, определяется как

$$Q = 2 \int_0^h \vartheta_x dy. \quad (1.15)$$

Подставляя значение ϑ'_x из (1.14) и интегрируя, получим

$$Q = 2h \left(U - \frac{h^2}{3\mu} \frac{dP}{dx} \right). \quad (1.16)$$

Произведя замену переменных

$$X = \frac{x}{\sqrt{2Rh_0}} \text{ и } Y = \frac{y}{\sqrt{2Rh_0}}, \quad (1.17)$$

получим выражение для градиента давления

$$\frac{dP}{dX} = \sqrt{2Rh_0} \left(\frac{3\mu}{h^2} \right) \left(U - \frac{Q}{2h} \right). \quad (1.18)$$

Согласно рис. 1.4 величина h является функцией координаты X и связана с ней соотношением

$$h = h_0 + R - \sqrt{R^2 - x^2}. \quad (1.19)$$

Разлагая третий член соотношения (1.19) в биномиальный ряд и отбрасывая все члены ряда за исключением двух первых, получим окончательно

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R}. \quad (1.20)$$

Производя замену переменной из (1.17), получим

$$h = h_0(1 + X^2). \quad (1.21)$$

Тогда уравнение (1.18) примет вид

$$\frac{dP}{dX} = \frac{\mu U}{h_0} \sqrt{\frac{18R}{h_0} \left[\frac{X^2 - X_k^2}{(1 + X^2)^3} \right]}, \quad (1.22)$$

где $X_k = \frac{x_k}{\sqrt{2Rh_0}}$ – значение координаты сечения выхода материала.

Интегрируя (1.21), получим

$$P = \frac{\mu U}{h_0} \sqrt{\frac{9R}{32h_0}} \left(\frac{(X^2 - 5X_k^2 - 3X_k^2 X - 1)X}{(1 - X^2)^2} + (1 - 3X_k^2) \arctg X_k + C \right). \quad (1.23)$$

Постоянная интегрирования C находится из условия выхода материала из области деформации

$$P(X) = 0; \quad \vartheta = U = \text{const}; \quad \tau = 0;$$

$$C = \left(\frac{1 + 3X_k^2}{1 + X_k^2} \right) X_k - (1 - 3X_k^2) \arctg X_k.$$

Величина $C = 5X_k^3$ представляет собой хорошее приближение в рассматриваемой области. Из уравнения (1.21) следует, что в точках $X = \pm X_k$ (где $X = X_k$ представляет собой точку максимального давления) тангенс угла наклона кривой давления равен нулю. Так как функция $f(X, X_k)$ может быть как положительной, так и отрицательной, то уравнение (1.21) имеет два корня, представляющие интерес, а именно

$X = -X_n$ и $X = +X_k$ (где X_n – координата сечения входа). Уравнение (1.21) показывает, что в этих точках должны существовать следующие условия

$$f(X_n, X_k) = -C(X_k) = -5X_k^3; \quad (1.24)$$

$$f(-X_n, X_k) = +C(X_k) = +5X_k^3. \quad (1.25)$$

Отсюда видно, что $-f(X_n, X_k) = -f(-X_n, X_k)$. Следовательно, между X_k и X_n существует только одно функциональное соотношение, которое показано на рис. 1.5.

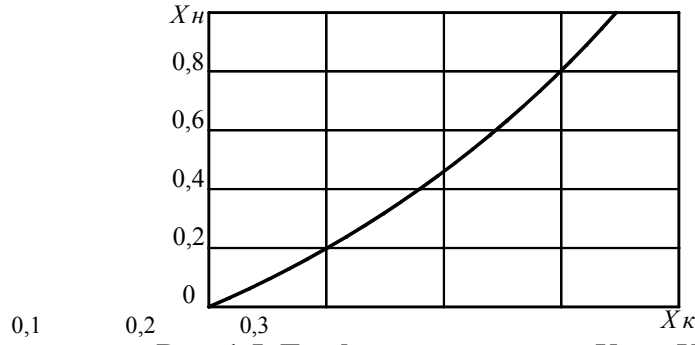


Рис. 1.5. График зависимости X_k от X_n

Гидростатическое давление жидкости, возникающее между валками, стремится раздвинуть валки. Эта сила называется распорным усилием и определяется интегрированием функции изменения удельного давления по дуге захвата:

$$F_n = L\sqrt{2Rh_0} \int_{-X_n}^{X_k} PdX = \frac{3\mu URL}{4h_0} \times \left(\left(\frac{X_k - X_n}{1 + X_n^2} \right) (X_n - X_k + 5X_k^3(1 + X_n^2)) + (1 + 3X_k^2)(X_k \operatorname{arctg} X_k - X_n \operatorname{arctg} X_n) \right). \quad (1.26)$$

Мощность, необходимая для приведения обоих валков в движение, легко определяется, если известен крутящий момент на них.

Крутящий момент на площадке dx валка равен

$$dM = \tau_b L dx R, \quad (1.27)$$

где τ_b – напряжение сдвига, которое по аналогии с уравнением для плоской щели равно

$$\tau_b = \frac{dP}{dx} h = \frac{h_0}{\sqrt{2Rh_0}} (1 + X^2) \frac{dP}{dX}. \quad (1.28)$$

Тогда из (1.27) с учетом (1.21) и (1.28) следует, что

$$dM = \tau_b RL dx = \sqrt{2Rh_0} \tau_b RL dX = \frac{\sqrt{2Rh_0}}{\sqrt{2Rh_0}} h_0 RL (1 + X^2) \frac{dP}{dX} = 3\mu U \sqrt{\frac{2R}{h_0}} LR \frac{(X^2 - X_k^2)}{(1 + X^2)^2} dX,$$

откуда

$$M = 3U\mu RL \sqrt{\frac{2R}{h_0}} \int_{-X_n}^{X_k} \frac{(X^2 - X_k^2)}{(1 + X^2)^2} dX = 3U\mu RL \sqrt{\frac{2R}{h_0}} \varphi(X_k). \quad (1.29)$$

Мощность привода определяется по формуле

$$N_n = 2M\omega = \frac{2MU}{R} = 6U^2\mu L \sqrt{\frac{2R}{h_0}} \varphi(X_k), \quad (1.30)$$

где ω – угловая скорость валков;

$$\varphi(X_k) = (1 + X_k^2)(\operatorname{arctg} X_k - \operatorname{arctg} X_n) - \frac{(X_k + X_n)(1 + X_k X_n)}{1 + X_n^2}. \quad (1.31)$$

Довольно простое выражение для вычисления распорного усилия получено в работе [7]:

$$P = 4\mu U \sqrt{\frac{R(h - h_0)}{h^2}}; \quad (1.32)$$

$$F_n = L \int_{h_0}^h P dx = 2\mu U RL \left(\frac{1}{h_0} - \frac{1}{h} \right). \quad (1.33)$$

Величина максимального давления по (1.32) составляет примерно 0,75 от максимального давления, определяемого по методу Гаскелла. Дальнейшее усовершенствование теории симметричного процесса вальцевания полимерных материалов проводится по линии совместного решения уравнения переноса количества движения и реологических характеристик неньютоновских жидкостей. В частности, в

работах [6, 8, 9] предложен метод расчета поля скоростей, напряжений сдвига, удельного давления в области деформации, распорного усилия и технологической мощности в процессе симметричного вальцевания аномально-вязких полимерных материалов со степенной зависимостью между напряжением и скоростью сдвига

$$\tau = \mu_1 \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right), \quad (1.34)$$

где μ_1 и n – реологические константы.

В этом случае система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dP}{dx} = \frac{d\tau}{dy}; \\ \frac{dP}{dy} = 0; \\ \tau = \mu_1 \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right). \end{cases} \quad (1.35)$$

Решение данной системы уравнений с использованием ранее описанных допущений и граничных условий, позволило определить:

1) распределение скоростей перерабатываемого материала в зоне деформации

$$\vartheta = U \left[1 + \frac{1+2n}{1+n} \frac{h-h_0}{h} \frac{1+n}{n} \left(y^{\frac{1+n}{n}} - h^{\frac{1+n}{n}} \right) \right]; \quad (1.36)$$

2) распределение давления в области деформации

$$P = \mu_1 \left(\frac{U}{h_0} \right)^n \left(\frac{1+2n}{n} \right)^n \sqrt{\frac{2R}{h_0}} \int_{-X_n}^{X_k} \frac{(\pm X^2 \pm X_k^2)^n}{(1+X^2)^{1+2n}} dX, \quad (1.37)$$

где X, X_k – безразмерные координаты положения, введенные Гаскеллом;

3) распределение удельной силы трения на поверхности вала

$$\tau = \pm \mu_1 \left(\frac{u}{h_0} \right)^n \left(\frac{1+2n}{n} \right)^n \left(\frac{X^2 - X_k^2}{(X^2 + 1)^{2n}} \right), \quad (1.38)$$

где знак плюс относится к зоне отставания $X > X_k$, а знак минус к зоне опережения $X < X_k$.

Величина распорного усилия определяется интегрированием кривой распределения удельного давления по дуге захвата

$$F_n = L \sqrt{2Rh_0} \int_{X_k}^{X_n} P dx = 2\mu_1 RL \left(\frac{U}{h_0} \right)^n F(X, n); \quad (1.39)$$

$$F(X, n) = \left(\frac{1+2n}{n} \right)^n \int_{-X_1}^{X_n} \int_{-X_1}^X \frac{(\pm X^2 \pm X_1^2)}{(1+X^2)^{1+2n}} dXdX. \quad (1.40)$$

При $n = 1$ (ньютоновская жидкость) уравнение (1.39) будет аналогично уравнению Гаскелла.

Мощность, необходимая для преодоления сил трения в области деформации, определяется как

$$N_n = 2LUT, \quad (1.41)$$

где T – сумма сил трения о поверхности валков.

Для нахождения T необходимо проинтегрировать кривую изменения сил трения на поверхности валка

$$N_n = 2Lu \int_{X_k}^{X_n} \tau dx = 2\mu_1 Lu \left(\frac{u}{h_0} \right)^n \left(\frac{1+2n}{n} \right)^n \sqrt{2Rh_0} \Phi(X, n), \quad (1.42)$$

где

$$\Phi(X, n) = \int_{X_1}^{X_n} \frac{(X^2 - X_1^2)^n}{(1 + X^2)^{2n}} dX - \int_{-X_1}^{X_1} \frac{(X_1^2 - X^2)^n}{(1 + X^2)^{2n}} dX. \quad (1.43)$$

При $n = 1$ уравнение (1.42) будет аналогично уравнению Гаскелла.

1.3. Несимметричное вальцевание полимерных материалов в изотермическом режиме

Аналізу данного процесса посвящено значительное количество работ [5, 9, 13]. Несимметричность процесса обусловлена разностью окружных скоростей заднего и переднего валков, то есть вальцевание осуществляется с фрикцией. Исходная система уравнений и основные допущения остаются такими же, как и в случае симметричного процесса вальцевания (1.35). Отличие состоит в принятии граничных условий, которые принимают вид

$$\begin{cases} u_1 = \omega_1(R + h_0 - h) \approx \omega_1 R & y = +h; \\ \text{при} & y = -h, \\ u_2 = \omega_2(R + h_0 - h) \approx \omega_2 R & \end{cases} \quad (1.44)$$

где $\omega_1 > \omega_2$ – угловые скорости вращения валков.

Решение системы уравнений (1.35) с использованием принятых граничных условий дает выражение для распределения скоростей частиц потока материала в направлении оси X :

$$v_x = \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{\left(\frac{dP}{dX} \right)^n \text{sign} \frac{dP}{dX} h^{n+1}}{2\mu_1^2 (n+1) (2Rh_0)^{n/2}} \left[(1 - \eta_0)^{n+1} + (1 + \eta_0)^{n+1} - 2(\eta - \eta_0)^{n+1} \right]. \quad (1.45)$$

Значение η_0 определяется трансцендентным выражением

$$\eta_0 = \left[\frac{X^2 - X_1^2}{h_0(1 + X_1^2)(\alpha - \beta)} \left(\frac{(1 + X^2) - \beta(1 + X_1^2)}{\alpha - 1} - \frac{(1 + X^2) - \alpha(1 + X_1^2)}{\beta - 1} \right) \right], \quad (1.46)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{(f+1)(n+2)}{2(f+n)+2}; \quad \beta = \frac{(f+1)(n+2)}{2(fn+f+1)}.$$

Из (1.46) следует, что функция $\eta_0(X)$ имеет точку разрыва при $X = X_1$. В области $X_2 \geq X \geq X_1$ величина η_0 лежит в пределах $-\infty \leq \eta_0 \leq 0$ и сечение нулевых напряжений сдвига располагается ближе к поверхности медленно вращающегося валка. В точке с координатой $\eta_0 = -1$ минимум скорости оказывается расположен на поверхности валка, вращающегося со скоростью u_2 . В сечении $\eta_0 = 1$ максимум скорости лежит на поверхности быстро вращающегося валка. Градиент давлений определяется из условия постоянства расхода. После всех преобразований получаем

$$\frac{dP}{dX} = \left[\frac{u_1(n+2)}{h_0} \right]^{1/n} \mu_1 B_1 \times \frac{(X_2^2 - X)^{1/n}}{\left[(1-\eta_0)^{n+1}(2n+5-\eta_0) + (1+\eta_0)^{n+1}(2n+3-\eta_0) \right]^{1/n}}, \quad (1.47)$$

где $u_1 = \frac{u_1 + u_2}{2}$; $B_1 = \frac{2^{1/n}(n+1)^{1/n}(2R)^{1/2}}{h_0^{1/2}}$.

Координата сечения максимального давления, определенная из условия $\frac{dP}{dX} = 0$, так же как и в случае симметричного вальцевания, равна $X_1 = -X_k$. Силовые и энергетические параметры несимметричного процесса вальцевания определяются численным интегрированием как и в случае симметричного процесса.

Расчет распорных усилий и мощности привода ведется по зависимостям, полученным на основе гидромеханической теории вальцевания. Как показано в [6]

$$P_p = (1+f)\mu_1 LR \left(\frac{u_1}{h_0} \right)^n F, \text{ кН}, \quad (1.48)$$

где функция $F = 1,93 + 3,63n + 1,22n^2$; n – индекс течения; f – фрикция между валками; μ – эффективная вязкость, Па·с; L – рабочая длина валка, м; R – его радиус, м; h_0 – минимальный зазор между валками, м; u_1 – скорость вращения переднего валка, м/с.

Мощность привода валков определяется по формуле

$$N_n = 2(1+f)\mu_1 L u_1 R \left(\frac{u_1}{h_0} \right)^n \frac{(2Rh_0)^{0,5}}{\eta} \Phi, \quad (1.49)$$

где функция $\Phi = 4,67 + 8,06n + 4,09n^2$; η – КПД привода вальцов.

Величины P_p и N_n могут быть найдены и по другим зависимостям [18].

Производительность вальцов периодического действия равна

$$G_n = \frac{60\rho q_1 \alpha}{T_{ц}}, \text{ кг/ч}, \quad (1.50)$$

где $q_1 = (0,0065 \dots 0,0085)DL$, дм^3 ; ρ – плотность смеси, кг/м^3 ; $T_{ц}$ – время цикла обработки смеси, мин; $\alpha = (0,8 \dots 0,9)$ – коэффициент использования машинного времени.

Производительность вальцов непрерывного действия

$$G_n = 60\pi D n b h \rho \alpha, \text{ кг/ч}, \quad (1.51)$$

где n – скорость вращения переднего валка, мин^{-1} ; b и h – ширина и толщина срезаемой ленты вальцеванной массы, соответственно, м.

Количество тепловой энергии, получаемой за счет превращения механической энергии в тепловую (мощность диссипации), [10]:

$$Q_N = 860 N_n \eta, \text{ Вт}, \quad (1.52)$$

где $N_n = N_n \eta$ – технологическая мощность (мощность, расходуемая на процесс смешения).

Производительность каландра как машины непрерывного действия (с однократным пропуском материала через данную пару валков) может быть определена по формуле

$$Q = v F \gamma \eta, \text{ кг/ч}, \quad (1.53)$$

где v – скорость выхода ленты (пленки), м/с; $F = h_k b$ – площадь поперечного сечения ленты в зазоре между валками (h_k , b – высота и ширина ленты), м^2 ; γ – удельный вес ленты, кг/м^3 ; η – коэффициент использования машинного времени.

Скорость v не равна окружной скорости валка, на который налипают материал; она будет несколько больше окружной скорости валка из-за так называемого опережения материала и фрикции.

Скорость выхода материала из каландра

$$v = v_1 \psi,$$

где ψ – коэффициент опережения; $v_1 = \pi D n$ – окружная скорость валка.

При наличии фрикции в формулу подставляется v и n валка, который движется с меньшей окружной скоростью. Производительность

$$Q = \pi D n h_k b \gamma \psi \eta . \quad (1.54)$$

Если основываться на теории пластической деформации материала между валками, то коэффициент опережения

$$\psi = 1 + \frac{R}{h_k} \beta^2 , \quad (1.55)$$

где R – радиус валка; h_k – минимальный зазор между валками; β – угол опережения.

Угол опережения

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right) , \quad (1.56)$$

где α – угол захвата; β – коэффициент трения о поверхность валка.

При наличии фрикции вместо величины ψ в уравнение (1.54) необходимо подставить значение

$$\psi_f = \psi \frac{1 + \frac{1}{f}}{2} .$$

На основе гидромеханической теории вальцевания весовая производительность

$$Q = 3600 \delta h_k \gamma L \frac{v_1 (1 + f)}{2} . \quad (1.57)$$

Тепловые потери в окружающую среду определяют по формулам свободной конвекции и лучеиспускания [10].

Тепловой баланс вальцов. При переработке пластичных материалов на вальцах происходят сложные тепловые процессы. В зависимости от режима работы и свойств перерабатываемого материала тепловой поток следует отводить или подводить к машине.

Необходимость охлаждения и нагрева определяется тепловым балансом машины, который можно записать в виде уравнения

$$G_M i_H + Q_N + G_B c_B t_{BH} = G_M i_K + G_B c_B t_{BK} + Q_n , \quad (1.58)$$

где G_M – количество материала, поступающего на переработку в единицу времени; i_H – энтальпия полимера при начальной температуре; i_K – энтальпия полимера при конечной температуре вальцевания; Q_N – количество тепловой энергии, полученной за счет превращения механической энергии в тепловую; G_B – количество охлаждающей воды, поступающей на валки; c_B , t_{BH} – удельная теплоемкость и температура воды на входе в валки; t_{BK} – температура воды на выходе из валков; Q_n – тепловые потери валков в окружающую среду.

На основании уравнения (1.58) теплового баланса можно определить количество тепла, уносимого охлаждающей водой,

$$Q_B = G_B c_B (t_{BK} - t_{BH}) = Q_N - Q_n - G_M (i_K - i_H) . \quad (1.59)$$

Количество тепловой энергии, полученной в результате диссипации механической энергии:

$$Q_N = 860 N \eta , \quad (1.60)$$

где N – средняя мощность, потребляемая вальцами; η – КПД привода с учетом потерь в подшипниках.

Тепловые потери в окружающую среду состоят из тепловых потерь процесса конвекции и тепловых потерь лучеиспускания

$$Q = (q_k + q_l) F , \quad (1.61)$$

где $q_k = \alpha_k (t_{CM} - t_B)$ – удельный тепловой поток конвекции; α_k – коэффициент теплоотдачи от валка к окружающему воздуху; t_{CM} – температура стенки валка (принимается равной температуре обрабатываемого материала, что несколько завышает значения тепловых потерь; при охлаждении валков температура их поверхности будет несколько ниже принимаемой); t_B – температура окружающего воздуха; q_l – удельный тепловой поток лучеиспускания, определяемый по формуле

$$q_l = \varepsilon C_0 (T_{CM}/100)^4 , \quad (1.62)$$

где ε – степень черноты поверхности валков (определяемая по справочнику с учетом того, что один из валков покрыт обрабатываемым материалом); T_{cm} – абсолютная температура поверхности валков; C_0 – константа излучения абсолютно черного тела.

Расчеты показывают, что в зависимости от свойств перерабатываемого материала количество теплоты, расходуемой на нагревание массы от t_n до t_k и на тепловые потери, составляет не более 10...25 % от общего тепловыделения Q_N . Большая часть тепловой энергии должна быть отведена охлаждающей водой во избежание недопустимого перегрева смеси. Количество тепловой энергии, отводимой охлаждающей водой, определяется по уравнению теплового баланса.

От вальцуемого материала необходимо отвести тепло в количестве

$$Q_B = kL\Delta t_{cp}, \quad (1.63)$$

где k – коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку.

Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_n}{d_b} + \frac{1}{\alpha\pi d_b}}, \quad (1.64)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала валка; d_n – наружный диаметр валка; d_b – внутренний диаметр валка (диаметр полости валка или средний диаметр окружности, проходящей через центры периферийных каналов); α – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности валка (или внутренней поверхности канала) к движущейся охлаждающей воде (определяется по одному из уравнений вынужденной конвекции в зависимости от режима движения); L – длина бочки валка; Δt_{cp} – средняя разность температур.

Средняя разность температур определяется по формуле

$$\Delta t_{cp} = t_{ct} - \frac{t_{BK} + t_{BH}}{2}. \quad (1.65)$$

Методика теплового расчета сводится к следующему. Определяют величины Q_n и G_b (предварительно задаются разностью температур $t_{BK} - t_{BH} = 5...7$ °C). Зная G_b и размеры внутренней полости валка (или размеры и количество периферийных каналов), можно определить скорость воды. Скорость воды необходимо знать для расчета коэффициента теплоотдачи α и коэффициента теплопередачи k .

Зная Q_b , k и L , можно определить Δt_{cp} и из уравнения (1.65) определить t_{BK} или t_{BH} . При известных (заданных) величинах t_{BK} и t_{BH} можно на основании уравнения (1.63) выяснить, достаточна ли длина бочки валков L для отвода заданного количества тепловой энергии Q_b . Если L недостаточна, то необходимо повысить интенсивность теплообмена (например, увеличить скорость течения воды, уменьшить размер каналов охлаждения и т.п.).

Следует отметить, что подобная методика расчета является ориентировочной; для точного расчета до сего времени еще нет достаточного количества экспериментальных данных по тепловому режиму валковых машин.

1.4. Анализ вальцевания и каландрования вязкоэластических материалов

Все описанные выше гидромеханические методы расчета процессов вальцевания и каландрования полимерных материалов не учитывают эластических свойств перерабатываемых материалов. Поэтому с их позиций невозможно объяснить ряд этапов, наблюдаемых при вальцевании реальных полимеров. Опубликовано несколько работ по созданию гидромеханического метода расчета процесса вальцевания и каландрования вязкоэластических материалов. В одной из них рассматривается процесс вальцевания вязкоэластической жидкости. Показано, что при вальцевании хорошо разогретого полибутадиена выходящий из зазора материал течет спокойно и переходит на валок, вращающийся с меньшей скоростью

(режим 1). При понижении температуры, сопровождающейся увеличением эластичности, на поверхности листа появляются волны (режим 3). Дальнейшее понижение температуры эластомера приводит к крошению его и образуется "шуба" из материала на одном из валков (режим 2). Дальнейшее понижение температуры приводит к тому, что эластомер начинает "садиться" в зазоре на оба валка полосами или происходит более интенсивное его крошение (режим 4). Авторы объясняют такое поведение эластомеров при деформировании особенностью реологических характеристик материала и характером его напряженного состояния. Далее рассматривается задача течения в зазоре между валками вязкоэластического материала, зависимость деформаций от напряжения которого описывается законом Ривлина – Эриксона

$$N_{wl} = \frac{\tau_m u}{L}, \quad (1.66)$$

где N_{wl} – безразмерный параметр; τ_m – максимальное время релаксации; u – характеристическая скорость; L – характеристическая длина.

$$\tau_m = \frac{1}{\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{d \log G(t)}{dt} \right]}. \quad (1.67)$$

При решении данной задачи получены выражения для определения составляющих скоростей частиц потока вдоль осей X и Y :

$$V = (f-1) \frac{\pi R \omega}{2h} (y^2 - h^2) \frac{dh}{dx} - \frac{1}{6\mu_1} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} (2h^3 + y^3 - 3h^2 y) + \frac{h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dh}{dx} (y-h); \quad (1.68)$$

$$u = (f+1)\pi R \omega + (f-1)\pi R \omega \left(\frac{y}{h} \right) + \frac{1}{2\mu_1} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - h^2), \quad (1.69)$$

где μ_1 – вязкость при нулевом сдвиге; ω – угловая скорость валков.

К достоинствам работы следует отнести довольно полное описание поведения вязкоэластических материалов при переработке на валковых машинах. В других работах при описании процесса вальцевания вязкоэластических жидкостей предполагают, что поведение материала при деформировании описывается реологическим уравнением Максвелла или уравнением Кельвина-Фойхта. Анализ работ этой группы методов показывает, что выведенные конечные уравнения отличаются чрезмерной сложностью, а также неявной формой уравнений для расчета силовых и энергетических параметров процесса. Нет еще достаточно надежных и простых методик пригодных для инженерных расчетов процессов переработки вязкоэластических материалов на валковых машинах.

1.5. ОПИСАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВАЛЬЦЕВАНИЯ И КАЛАНДРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методы расчетов неизотермических процессов вальцевания и каландрования можно найти в работах [9]. Математическая модель неизотермического процесса строится в предположении, что реологические свойства смеси описываются степенным уравнением (1.34). Кинематическая картина движения и все предположения и допущения остаются такими же, как и в случае симметричного вальцевания аномально-вязкой жидкости.

Система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}; \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial P}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial P}{\partial z} = 0; \\ \tau_{xy} = \mu_1 \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right); \\ \mu_1 = \mu_0 e^{-b(T-T_0)}; \\ \rho c_v \vartheta_x \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + A \tau_{xy} \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y}, \end{array} \right. \quad (1.70)$$

где μ_0 – коэффициент однородной вязкости материала в сечении входа в область деформации; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; ρ – плотность жидкости; A – термический эквивалент работы; λ – коэффициент теплопроводности материала; b – экспериментальный коэффициент.

Начальные и граничные условия:

$$P = 0, T = T_0 \text{ при } X = X_n;$$

$$P = 0, \tau = 0, \vartheta = \text{const при } X = X_k;$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \eta} = 0, \tau = 0, \frac{\partial T}{\partial \eta} = 0 \text{ при } \eta = 0;$$

$$T_0 = T_w, u_1 = u_2 = u \text{ при } \eta = \pm 1.$$

Решение системы уравнений (1.70) с учетом начальных и граничных условий позволяет рассчитать температурные поля и энергосиловые параметры процесса. Результаты расчета температурного поля в зоне деформации показали наличие трех экстремумов: двух максимумов и одного минимума. Оба максимума располагаются в непосредственной близости от поверхности валков, а минимум – в центре зазора. Такая форма температурного поля объясняется тем, что величина энергии диссипации достигает максимума на поверхности обрабатываемого материала, а в центре тепловыделения отсутствуют. Результаты вычислений энергосиловых параметров процесса каландрования по неизотермической модели несколько ниже результатов вычислений таких же параметров по изотермической модели каландрования.

Так,

расчет

распорных усилий для промышленного каландра с размером валков 610×1800 при листовании резиновой смеси на основе бутадиенстирольного каучука по формулам изотермической модели дает значение, превышающее на 17,5 % данные расчета по неизотермической модели.

Ошибка в определении мощности привода валков достигает 21,5 %.

1.6. Порядок расчета валковых машин периодического действия

Исходные данные, которые необходимо знать для расчета: геометрические размеры валков, величина межвалкового зазора, фрикция между валками, скорость вращения валков, угол захвата материала и реологические константы перерабатываемого полимерного материала.

По одной из приведенных теорий определяют величину распорного усилия между валками и технологической мощности, необходимой на преодоление сил трения перерабатываемого материала. С учетом потерь в валковых подшипниках и передаточных механизмах определяют мощность привода валковой машины и по каталогу подбирают тип электродвигателя. При переработке полимерного материала в нескольких зазорах валковой машины (обычно на каландрах) необходимо провести расчет распорного усилия и технологической мощности для каждого межвалкового зазора.

Проводят прочностные расчеты конструктивных элементов валковых машин. Расчетные схемы составляют из анализа сил, действующих на тот или иной элемент конструкции. Прочностные расчеты конструктивных элементов валковых машин представлены в [7, 10].

Находят производительность валковой машины [7, 10, 11].

Проводят тепловые расчеты процесса вальцевания или каландрования. Достаточно полный материал по теплообмену при переработке полимерных материалов на вальцах и каландрах представлен в литературе [7, 12].

2. АНАЛИЗ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. ОПИСАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ

Известно, что к недостаткам периодического процесса переработки полимерных материалов на вальцах следует отнести:

- а) существование замкнутых линий тока;
- б) отсутствие перемещения обрабатываемого материала вдоль образующих валков.

Все это ухудшает смесительный эффект и диспергирование вальцуемой смеси по всему объему. Кроме этого, периодический процесс вальцевания является одним из самых трудоемких технологических процессов в производстве и переработке пластических масс и резиновых смесей, требующих больших затрат физического труда рабочего-вальцовщика. Перевод вальцов на непрерывный режим работы позволяет снизить эти затраты и существенно облегчить труд. Схема работы вальцов непрерывного действия показана на рис. 2.1.

В процессе непрерывного вальцевания обрабатываемый материал непрерывно поступает между двумя вращающимися навстречу друг другу валками в некоторой ограниченной области рабочей поверхности валков. На некотором расстоянии от места загрузки прошедший обработку материал срезается в виде непрерывной ленты и удаляется. При этом работу вальцов по непрерывному режиму можно осуществлять двумя способами:

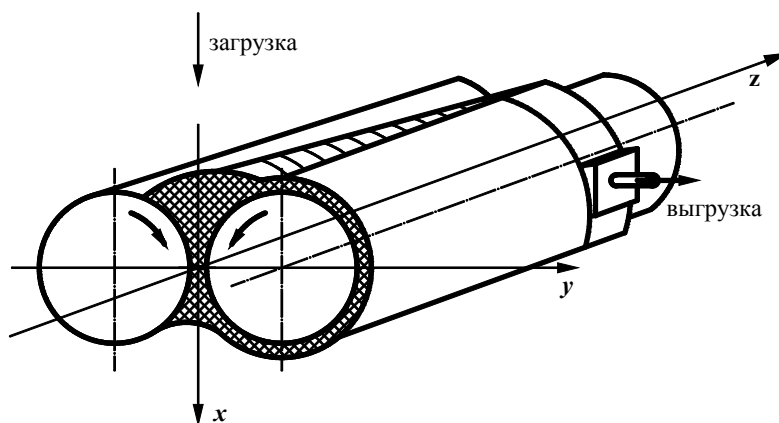


Рис. 2.1. Схема работы вальцов непрерывного действия

1) непрерывной загрузкой материала с одной стороны валка и срезанием ленты материала с другой стороны;

2) непрерывной загрузкой материала в середине валка и срезанием ленты материала с обеих сторон валка.

В результате вращения валков в зазоре между ними возникает поток материала со скоростями частиц, имеющими проекции на все оси координат (в случае периодического режима работы вальцов проекции скоростей частиц потока на ось Z отсутствуют).

Рассмотрим упрощенный анализ потока ньютоновской жидкости в направлении оси Z , возникающий вследствие осуществления непрерывного симметричного процесса вальцевания [15]. Упрощение решения состоит в принятии следующих допущений:

1) распределение проекций скоростей частиц потока на плоскость XOY и давления жидкости в любом сечении, параллельном этой плоскости, соответствует решению Гаскелла, т.е.

$$|P|_z \equiv \text{const} = \frac{3U\mu\sqrt{2Rh_0}}{8h_0^2} \left[\frac{X - 5X_k^2 - 3X_k^2 X^2 - 1}{(1 + X^2)^2} X + (1 + 3X_k^2) \text{arctg} X + \frac{1 + 3X_k^2}{1 + X_k^2} X_k - (1 - 3X_k^2) \text{arctg} X_k \right]; \quad (2.1)$$

$$|V_x|_z = \text{const} = U + \frac{3UR(X^2 - X_k^2)}{h_0(1 + X^2)^2} \left[y - \frac{h_0}{2k} (1 + X^2)^2 \right]; \quad (2.2)$$

2) движение жидкости в направлении оси валков происходит вследствие перепада в этом направлении давления $\frac{\partial P}{\partial z}$, который может возникнуть только в случае изменения высоты запаса материала вдоль оси Z . Следовательно, для возникновения продольного потока необходимо уменьшение высоты запаса материала X_n , являющегося однозначной функцией X_k .

При решении рассматриваемой задачи принято упрощение, состоящее в том, что продольный поток в межвалковом зазоре рассматривается как сумма независимых элементарных участков потоков между плоскими параллельными пластинами, расстояние между которыми $2h$, ширина dx , а длина (в направлении потока) dz , причем каждый из этих элементарных потоков обусловлен постоянным (в пределах dx и dz) перепадом давления. Тогда распределение проекций на ZOY скоростей частиц и расход каждого элементарного потока определяется известными уравнениями расхода через плоскую щель, которые в принятых обозначениях и безразмерных координатах могут быть записаны в виде

$$dQ = -\frac{(2h)^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} dX; \quad (2.3)$$

$$V_z = \frac{\sqrt{2Rh_0}}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \left[y^2 - \frac{h_0}{2R} (1 + X^2)^2 \right]. \quad (2.4)$$

Остальные допущения (несжимаемость жидкости, изотермичность потока, прилипание жидкости к поверхностям валков, преобладание вязкостных сил) те же, что и в решении Гаскелла для случая периодического вальцевания. С учетом принятых упрощений можно найти зависимость координаты выхода материала X_k , а соответственно и X_n , от производительности и координаты положения Z .

Для этого продифференцируем уравнение (2.1) по Z и получим значение перепада давления по длине валка

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{3U\mu\sqrt{2Ph_0}}{8h_0^2} \frac{\partial X_k}{\partial z} \left[\frac{-X(5 + 3X^2)2X_k - 6X_k \text{arctg} X +}{(1 + X^2)^2} + 6X_k \text{arctg} X_k + \frac{2X_k^2(3X_k^2 + 5)}{(1 + X_k^2)^2} \right]. \quad (2.5)$$

Подставив (2.5) в (2.3) и интегрируя в пределах X_n до X_k , после преобразований получим выражение для определения расхода

$$Q^*z = \int_{X_{k0}}^{X_k} \left[\frac{2X_k^2(3X_k^2+5)}{(1+X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + \right. \\ \left. + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - X_k^3(3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + \right. \\ \left. + X_k X_H^2(3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) - 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dX_k, \quad (2.6)$$

где $Q^* = \frac{4Q}{Uh_0\sqrt{2Rh_0}}$; Q – расход полимера вдоль оси Z валка вальцев.

При вычислении данного интеграла принято приближенное соотношение между X_H и X_k вида

$$X_H = 2X_k + aX_k^b. \quad (2.7)$$

В случае вальцевания ньютоновской жидкости $a = 5 \cdot 10^4$, $b = 13$.
График зависимости $Q^*z = f(X_k)$ представлен на рис. 2.2.

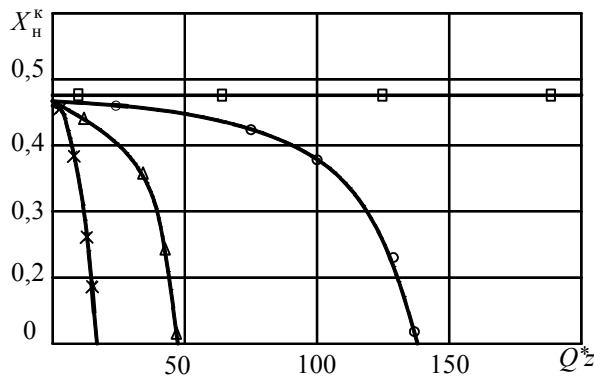


Рис. 2.2. Зависимость $Q^*z = f(X_k)$:
□ – $X_k = 0,45$; ○ – $X_k = 0,2$; △ – $X_k = 0,1$; × – $X_k = 0,05$

Чтобы получить выражение, описывающее распределение скоростей частиц потока по длине валка вальцев воспользуемся уравнением (2.4), подставив в него $\partial P/\partial z$ из (2.5) и $\partial X_k/\partial z$ из (2.6):

$$W = (1+X^2) \left[\left(\frac{Y}{H} \right)^2 - 1 \right] \times \\ \times \frac{2X^2(5+3X^2)}{(1+X^2)^2} - \\ - \frac{AX - 3,4X_k X^2 - AX^3 - 3,34X_k X^4 + 0,6AX^5 - 0,86X_k X^6 + 0,143AX^7 -}{-6X_k \arctg X + A} \Big|_{X_H}^{X_k}, \quad (2.8)$$

где $A = 6X_k \arctg X_k + \frac{2X_k^2(3X_k^2+5)}{(1+X_k^2)^2}$; $W = \frac{V_z 4h_0 \sqrt{2Rh_0}}{3Q}$; V_z – компонента скорости материала вдоль оси Z ;

$H = \frac{h}{\sqrt{2Rh_0}}$ – безразмерная координата.

Распределение скоростей по рабочей длине валка и по высоте межвалкового зазора определяется по этому уравнению при подстановке в него различных значений X_H , X_k и Y/H . Типичная эпюра профиля скоростей частиц потока вдоль рабочей длины валка показана на рис. 2.3.

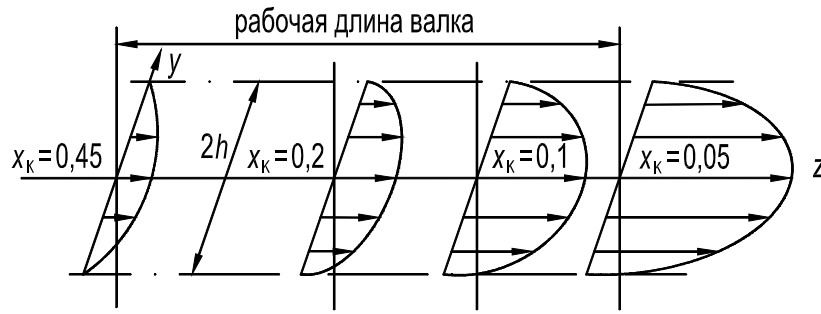


Рис. 2.3. Распределение скоростей частиц вдоль оси валка

Анализ зависимости (2.8) показывает, что по мере продвижения материала вдоль оси валка скорости частиц потока плавно возрастают, достигая максимума в сечении выхода материала с валка ($X \rightarrow 0$). Уравнение (2.6) дает возможность (в пределах правомерности сделанных допущений) установить соотношение между основными параметрами процесса непрерывного вальцевания: производительностью, окружной скоростью валков, диаметром валков, длиной их рабочей части, величиной межвалкового зазора и величиной запаса материала на валках, т.е. позволяет провести анализ процесса с различных точек зрения и выбрать оптимальные соотношения между указанными параметрами.

Эти уравнения дают возможность определить величину координаты сечения входа (а, следовательно, и величину координаты сечения выхода) в любом поперечном валкам сечении, что, в свою очередь, позволяет применить решение Гаскелла для определения остальных параметров процесса непрерывного вальцевания (распорных усилий, крутящих моментов на валках и потребляемой мощности). Следует заметить, что в уравнения (2.6) и (2.8) не входит вязкость полимера. Можно предположить, что в основной массе потока $V_x \gg V_z$ и распределение скорости частиц потока V_z по рабочей длине валка при вальцевании неньютоновских жидкостей будет таким же, как и в случае ньютоновских жидкостей. Поэтому уравнения (2.6) и (2.8) могут быть использованы и при расчете процессов и оборудования для переработки широкого класса полимерных материалов. В этом случае должны быть изменены коэффициенты a и b в уравнении (2.7) или применены более точные зависимости между X_n и X_k для неньютоновских жидкостей. Как показано в работе Д.М. Мак-Келви и представлено графически в работах Н.Г. Бекина, между X_n и X_k существует функциональное соотношение, зависящее только от свойств перерабатываемого материала:

$$\int_{X_k}^{X_n} \frac{(\pm X^2 \pm X_k^2)^n}{(1 + X^2)^{2n+1}} dX = 0 \quad (2.9)$$

при условии $P(x) = 0$, если $X = X_k$.

Используя (2.9), можно вычислить значения безразмерного комплекса $Q^* z$ [уравнение (2.6)] для различных значений координаты сечения входа и выхода в случае непрерывного вальцевания аномально вязкой жидкости, течение которой подчиняется степенному закону

$$\tau = \mu_1 \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right). \quad (2.10)$$

Величина комплекса $Q^* z$, найденная для различных значений индекса течения n и координаты сечения входа X_{n0} при $Z = 0$, показана на графике рис. 2.4.

Анализ данной зависимости показывает, что величина комплекса $Q^* z$ увеличивается с уменьшением индекса течения n (т.е. чем больше вальцуемый материал отличается от ньютоновской жидкости). На величину и характер изменения $Q^* z$ большое влияние оказывает величина запаса перерабатываемого материала на валках вальцов.

Гидростатическое давление жидкости, возникающее между валками в процессе обработки материала на вальцах, стремится раздвинуть валки. Сила, стремящаяся раздвинуть валки, называется распорным усилием. Величина распорного усилия может быть посчитана как произведение суммы проекций

на плоскость YOZ (рис. 2.1) элементарных сил давления и трения на величину поверхности, по которой эти элементарные силы действуют. Распорные усилия, приложенные к поверхности каждого из двух валков, равны между собой по модулю и направлены в разные стороны.

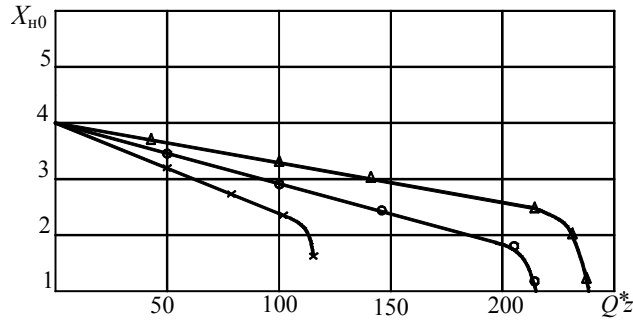


Рис. 2.4. Зависимость Q_z^* от индекса течения:

$\times - n = 1$; $\circ - n = 0,38$; $\Delta - n = 0,20$

Направление действия (линия действия) равнодействующей сил гидростатического давления и трения обрабатываемого материала в области деформации зависит от физико-механических свойств материала, температуры процесса, диаметров и скоростей вращения валков, материала валков, величины зазора, формы и соотношения кривых удельного давления смеси на каждом валке.

Для расчета величины распорного усилия валцов, работающих по непрерывному режиму, воспользуемся известными уравнениями, выведенными Гаскеллом [9, 19] для валцов периодического действия, в случае переработки ньютоновской жидкости

$$F_n = L\sqrt{2Rh_0} \int_{-X_H}^{X_K} P dx = \frac{3\mu URL}{4h_0} \left\{ \left(\frac{X_K + X_H}{1 + X_H^2} \right) \times \right. \\ \left. \times [X_H - X_K + 5X_K^3(1 + X_H^2)] + (1 - 3X_K^2)(X_K \arctg X_K - X_H \arctg X_H) \right\}. \quad (2.11)$$

Так как в процессе непрерывного вальцевания координата сечения входа материала X_H , а соответственно и координата сечения выхода X_K непрерывно изменяется по длине валка (достигая максимума в зоне загрузки и уменьшаясь до нуля в зоне выгрузки), то гидростатическое давление жидкости и распорное усилие тоже не остаются постоянными по рабочей длине валка. Из (2.11) видно, что распорное усилие является функцией параметров X_H и X_K , которые в свою очередь зависят от координаты положения Z . Поэтому распорное усилие, возникающее в процессе непрерывного вальцевания ньютоновской жидкости можно определить следующим образом:

$$F_n = \frac{3\mu UR\sqrt{2Rh_0}}{4h_0} \int_0^z \left(\frac{X_K + X_H}{1 + X_H^2} \right) [X_H - X_K + 5X_K^3(1 + X_H^2)] + \\ + (1 - 3X_K^2)(X_K \arctg X_K - X_H \arctg X_H) dz. \quad (2.12)$$

Так как между X_K и Z существует функциональное соотношение, описываемое уравнением (2.6), поэтому, заменяя переменную интегрирования в уравнении (2.12) Z на X_K , получим окончательное выражение для нахождения распорного усилия при непрерывном режиме работы валцов:

$$F_n = \frac{3\mu U^2 R^2 h_0}{8Q} \int_{X_{K0}}^0 f(X_K) dX_K, \quad (2.13)$$

где

$$f(X_K) = \left\{ \left(\frac{X_K + X_H}{1 + X_H^2} \right) [X_H - X_K + 5X_K^3(1 + X_H^2)] + \right. \\ \left. (1 - 3X_K^2) [X_K \arctg X_K - X_H \arctg X_H] \right\} \times \\ \times \left[\frac{6X_K^4 + 10X_K^2}{(1 + X_K^2)^2} (X_K + X_K^3 + 0,6X_K^5 + 0,143X_K^7 - X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + 6X_k \operatorname{arctg} X_H \left(X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7 \right) - \\
& - 6X_k \operatorname{arctg} X_k \left(X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7 \right) + \\
& \left. + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2) \right]. \quad (2.14)
\end{aligned}$$

При вычислении интеграла по уравнению (2.13) необходимо пользоваться приближенным соотношением (2.7) между X_k и X_H или более точными зависимостями (2.9).

Используя данную методику, можно найти величину распорного усилия при непрерывном симметричном вальцевании аномально вязкой жидкости, течение которой подчиняется степенному закону (2.10):

$$F_n = \frac{\mu_1 UR^2 h_0^2 \left(\frac{U}{h_0} \right)^n \left(\frac{1+2n}{n} \right)^n}{Q} f_1(X_k, n), \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}
f_1(X_k, n) = & \int_{X_{k0}}^0 \int_{X_k}^{X_H} \int_{X_k}^X \frac{(\pm X^2 \pm X_k^2)^n}{(1 + X^2)^{2n+1}} \times \\
& \times \left[\frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H + X_H^3 - 0,6X_H^5 + \right. \\
& \left. + 0,143X_H^7) + 6X_k \operatorname{arctg} X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \right. \\
& \left. - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \right. \\
& \left. + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2) \right] dx dx dx_k. \quad (2.16)
\end{aligned}$$

При вычислении функции $f_1(X_k, n)$ необходимо пользоваться соотношением между X_k и X_H в виде зависимостей (2.7) или (2.9).

В случае несимметричного процесса непрерывного вальцевания аномально вязких материалов величина распорного усилия может быть определена как

$$F_n = \frac{\mu_1 UR^2 h_0^2 (1 + f) \left(\frac{U}{h_0} \right)^n \left(\frac{1+2n}{n} \right)^n}{2Q} f_1(X_k, n). \quad (2.17)$$

Значение функции $f_1(X_k, n)$ вычисляется по уравнению (2.16).

2.2. Определение мощности привода валков вальцов непрерывного действия

Энергия, подводимая к валкам вальцов, расходуется на преодоление сил сопротивления материала, протягиваемого через постепенно сужающуюся зону деформации, обусловленных его вязкостью. Работа, затрачиваемая при этом на деформацию обрабатываемого материала, большей частью превращается в тепло, которое расходуется на нагревание материала и отдается в окружающую среду. Кроме этого, часть подводимой энергии расходуется на преодоление трения в подшипниках валков и передающих механизмах привода. Мощность, потребляемая вальцами, зависит от многих факторов: свойств и температуры обрабатываемого материала, окружных скоростей валков, величины фрикции, зазора между валками, величины загрузки материала и других.

Для расчета технологической мощности, расходуемой на преодоление сил вязкого сопротивления материала, протягиваемого через постепенно сужающуюся зону деформации при непрерывном вальцевании ньютоновской жидкости, воспользуемся известными уравнениями, выведенными Гаскеллом [8] для периодического процесса вальцевания ньютоновской жидкости:

$$N_n = 3LU^2\mu\sqrt{\frac{2R}{h_0}}f(X_k); \quad (2.18)$$

$$f(X_k) = (1 - X_k^2)(\operatorname{arctg}X_k + \operatorname{arctg}X_H) - \left[\frac{(X_k + X_H)(1 + X_kX_H)}{(1 + X_H^2)} \right]. \quad (2.19)$$

Основным отличием непрерывного процесса вальцевания от периодического является то, что высота запаса материала в межвалковом зазоре при непрерывном режиме не остается постоянной, как при периодическом режиме работы, а является функцией координаты положения Z . Откуда следует, что мощность, расходуемая на деформацию материала в зазоре между валками вальцов при непрерывном режиме работы будет неодинакова по рабочей длине валка. Поэтому для определения суммарной технологической мощности, затрачиваемой на деформацию всего объема материала, находящегося на валках, необходимо определить единичную мощность, расходуемую на элементарном участке длиной dZ .

На основании (2.18) и (2.19) и при введении безразмерной координаты положения $Z = \frac{z}{\sqrt{2Rh_0}}$ эта мощность определяется выражением

$$dN = 6U^2\mu R \left\{ (1 - X_k^2)(\operatorname{arctg}X_k + \operatorname{arctg}X_H) - \left[\frac{(X_k + X_H)(1 + X_kX_H)}{(1 + X_H^2)} \right] \right\} dZ. \quad (2.20)$$

Полная технологическая мощность определяется из (2.20) интегрированием его в пределах от 0 до Z :

$$N_n = 6U^2\mu R \int_0^Z \left\{ (1 - X_k^2)(\operatorname{arctg}X_k + \operatorname{arctg}X_H) - \left[\frac{(X_k + X_H)(1 + X_kX_H)}{(1 + X_H^2)} \right] \right\} dZ. \quad (2.21)$$

Так как между X_k и Z существует функциональное отношение вида (2.6), то заменяя в уравнении (2.21) переменную интегрирования Z на X_k и предел интегрирования Z на X_{k0} , получим

$$N_n = \frac{3\mu U^3 Rh_0 \sqrt{2Rh_0}}{2Q} f_2(X_k), \quad (2.22)$$

где

$$f_2(X_k) = \int_{X_{k0}}^0 \left\{ (1 - X_k^2)(\operatorname{arctg}X_k + \operatorname{arctg}X_H) - \left[\frac{(X_k + X_H)(1 + X_kX_H)}{(1 + X_H^2)} \right] \right\} \times \\ \times \left[\frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7) - \right. \\ \left. - X_k^3(3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_kX_H^2(3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) - \right. \\ \left. - 6X_k\operatorname{arctg}X_k(X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) + \right. \\ \left. + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2) \right\} dX_k. \quad (2.23)$$

При численном интегрировании функции $f_2(X_k)$ необходимо пользоваться соотношением (2.7) между X_k и X_H или (2.9).

Используя такой же подход, можно найти величину технологической мощности, необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления аномально вязкого материала, течение которого в межвалковом зазоре подчиняется степенному закону (2.10) при симметричном режиме работы вальцов:

$$N_H = \frac{\mu_1 U^2 R h_0 \sqrt{2 R h_0} \left(\frac{U}{h_0}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n}{Q} f_3(X_K, n), \quad (2.24)$$

$$f_3(X_K, n) = \int_{X_{K0}}^0 \int_{X_K}^{X_H} \frac{(\pm X^2 \mp X_K^2)}{(1+X^2)^{2n}} \left[\frac{6X_K^4 + 10X_K^2}{(1+X_K^2)^2} \times \right. \\ \times (X_K + X_K^3 + 0,6X_K^5 + 0,143X_K^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + \\ + 6X_K \operatorname{arctg} X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ - 6X_K \operatorname{arctg} X_K (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ \left. - X_K^3 (3,4 + 3,34X_K^2 + 0,86X_K^4) + X_K X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \right. \\ \left. + 1,4X_K \ln(1+X_K^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dX dX_K. \quad (2.25)$$

При численном интегрировании $f_3(X_K, n)$ необходимо пользоваться соотношением (2.9) между X_K и X_H .

Величина технологической мощности при несимметричном вальцевании anomalно вязкой жидкости со степенным законом течения при непрерывном режиме работы может быть определена ориентировочно:

$$N_n = \frac{\mu_1 U^2 R h_0^2 \sqrt{2 R h_0} \left(\frac{U}{h_0}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \left(\frac{f+1}{2}\right)}{Q} f_3(X_K, n). \quad (2.26)$$

Значение функции $f_3(X_K, n)$ вычисляется по уравнению (2.25).

Общая величина мощности, необходимая для привода валков вальцов, работающих по непрерывному режиму, будет больше технологической мощности, полученной по уравнениям (2.22) – (2.26), вследствие того, что часть мощности привода будет расходоваться на преодоление сил трения в подшипниках валков вальцов. Эта часть мощности может быть найдена, если известна величина распорного усилия F_n , коэффициент трения втулки подшипника о цапфу валка и геометрические размеры валка

$$N_n^T = \pi d(n_1 + n_2) f F_n. \quad (2.27)$$

Мощность электродвигателя привода вальцов будет найдена суммированием величин технологической мощности и мощности, расходуемой на преодоление сил трения в подшипниках и деленной на КПД привода машины.

Определение оптимальной величины запаса материала в межвалковом зазоре из условия максимального механического воздействия.

Для определения оптимальной величины загрузки материала на валки вальцов необходимо выбрать критерий оценки механического воздействия на вальцуемый материал. В качестве такого критерия можно принять величину удельной мощности, т.е. отношение мощности, рассеиваемой в материале при его переработке, к объему вальцуемого материала, которая и будет характеризовать интенсивность обработки.

Для определения удельной мощности при непрерывном процессе вальцевания anomalно вязких материалов со степенной зависимостью между напряжением и скоростью сдвига необходимо знать величину технологической мощности и объема материала, находящегося на валках вальцов.

Величину технологической мощности, расходуемой на деформацию обрабатываемого материала в зазоре валков вальцов, работающих по непрерывному режиму, найдем по уравнениям (2.24)–(2.25). Величину объема материала, находящегося на валках вальцов, с учетом "шубы" определим по уравнению согласно [16]:

$$V = \frac{R h_0^3 U \sqrt{2 R h_0}}{Q} \varphi_1 \left(X_K \frac{R}{h_0} \right), \quad (2.28)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1 = & \int_{X_{к0}}^{X_{кк}} \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_0}}} (1 - X_k^2) \left[\frac{R}{h_0} + (1 + X_k^2) \right] - (1 + X_k^2) (X_k + X_H) + \right. \\ & \left. + \left[X_H + X_k + \frac{1}{3} (X_H^4 + X_k^4) \right] \right\} \times \left[\frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + \right. \\ & + 0,143 X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,144 X_H^7) + \\ & + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143 X_H^7) - \\ & - 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143 X_H^7) - \\ & - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\ & \left. + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2) \right] dx. \end{aligned}$$

Величина удельной мощности, реализуемой при непрерывном режиме вальцевания аномально вязкой жидкости, определяется как

$$q = \frac{N_H}{V} = \mu_1 \left(\frac{U}{h_0} \right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n F_0 \left(X_k, n, \frac{R}{h_0} \right), \quad (2.29)$$

где

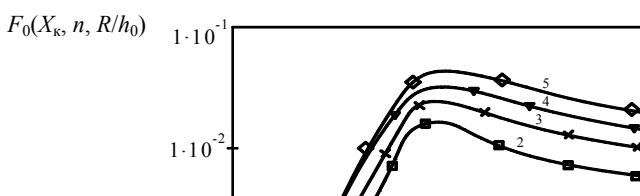
$$F_0 \left(X_k, n, \frac{R}{h_0} \right) = \frac{\int_{X_{к0}}^{X_{кк}} \int_{X_k}^{X_H} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)^n}{(1 + X^2)^{2n}} \Psi(X_k) dX dX_k}{\int_{X_{к0}}^{X_{кк}} \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_0}}} (1 + X_k^2) \left[\frac{R}{h_0} + (1 + X_k^2) \right] - \right. \\ \left. - (1 + X_k^2) (X_k + X_H) + X_H + X_k + \frac{1}{3} (X_H^4 + X_k^4) \right\} \Psi(X_k) dX_k}, \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \Psi(X_k) = & \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} \times \\ & \times (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + \\ & + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ & - 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ & - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\ & + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2). \quad (2.31) \end{aligned}$$

Зависимость удельной мощности от координаты сечения для различных значений индекса течения n и величины отношения R/h_0 представлена на рис. 2.5 и 2.6.

Анализ зависимости (2.29), представленной на рис. 2.5 и 2.6, показывает, что существует такой режим непрерывного процесса вальцевания, при котором степень механического воздействия на материал (величина удельной мощности) будет максимальной. Причем, чем больше вальцуемый материал отличается от ньютоновской жидкости, тем больше величина удельной мощности и максимум ее смещается в сторону больших запасов материала на валках (рис. 2.5, кривые 1 – 5).

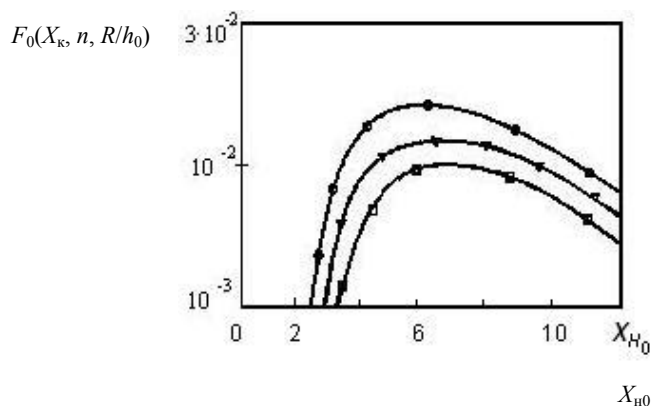
$$q_1 = \frac{N_n}{V \mu_1 \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n \left(\frac{U}{h_0} \right)^{n+1}} = F_0(X_k, n, R/h_0).$$



X_{H0}

Рис. 2.5. Зависимости удельной мощности от координаты сечения для:

$F - n = 1$; $\square - n = 0,5$; $\times - n = 0,38$; $\Delta - n = 0,2$; $\diamond - n = 0,125$; $\frac{R}{h_0} = 100$



X_{H0}

Рис. 2.6. Зависимости удельной мощности от координаты сечения для:

$n = 0,38$; $F - \frac{R}{h_0} = 50$; $\Delta - \frac{R}{h_0} = 100$; $\square - \frac{R}{h_0} = 200$

2.3. Расчет основных параметров непрерывного процесса вальцевания полимерных материалов

В качестве исходных параметров, необходимых для расчета, принимаются:

- 1) реологические константы перерабатываемого материала μ и n ;
- 2) продолжительность вальцевания τ_B ;
- 3) удельная мощность, реализуемая в процессе механической обработки материала на вальцах q ;

При расчете основных параметров непрерывного процесса вальцевания могут встретиться два варианта задач:

- 1) при заданных геометрических размерах валков, скоростях вращения и фрикции необходимо определить производительность;
- 2) при заданной производительности необходимо определить основные геометрические размеры валков (диаметр и длину).

2.3.1. Расчет основных параметров процесса и оборудования по первому варианту

Для расчета дополнительно должны быть заданы: скорость вращения переднего валка, фрикция валков и геометрические размеры валков (радиус бочки валка и длина рабочей части его).

В процессе расчета необходимо определить:

- 1) оптимальную высоту запаса материала на валках X_n ;
- 2) минимальный зазор между валками $2h_0$;
- 3) производительность вальцов, при непрерывном режиме работы Q ;
- 4) силовые и энергетические параметры процесса (распорное усилие F_n и технологическую мощность N_n , а также мощность привода вальцов);
- 5) провести прочностной расчет основных деталей и узлов машины (валков, станины, механизма регулировки зазора).
- 6) тепловой расчет.

2.3.2. Расчет основных параметров процесса и оборудования по второму варианту

- 1 Определяем объем единовременной загрузки материала на валцы q_1 по формуле (1.50) или (1.51).
 - 2 Определяем длину L и диаметр валка D , дм с учетом соотношения $L = 3D$ по формуле $q_1 = (0,0065 \dots 0,0085)DL$, дм³. Полученные значения L и D уточняем по ГОСТ 14333–73.
 - 3 Определяем оптимальную высоту запаса материала. Для этого по графику (рис. 2.5 и 2.6) находим величину координаты сечения входа обрабатываемого материала $X_{н0}$, соответствующую максимальному значению удельной мощности. По значению $X_{н0}$ легко определить координату сечения выхода материала.
 - 4 Находим рабочий (оптимальный) зазор между валками. По формулам (2.29) – (2.31) для различных значений R/h_0 вычисляем величину максимального значения функции F_0^{\max} (рис. 2.6).
- По полученным значениям функции F_0^{\max} строим график зависимости F_0 от величины зазора между валками (рис. 2.7).

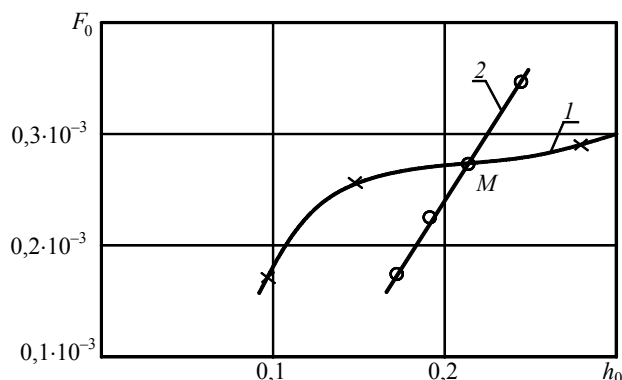


Рис. 2.7. Зависимость F_0 от величины зазора между валками:
 $1 - F_0^{\max}(X_k, n, R/h_0)$; $2 - F_0^p(X_k, n, R/h_0)$

Далее по уравнению (2.29) для заданного по условию значения величины удельной мощности находим величину функции $F_0^p(X_k, n, R/h_0)$ для различных значений величины зазора и строим график зави-

симости ее от h_0 (кривая 2, рис. 2.7). Точка пересечения графиков функций F_0^{\max} и F_0^p (точка M) определяет величину межвалкового зазора h_0 для заданного значения удельной мощности.

3 Определяем производительность вальцов, работающих по непрерывному режиму.

Согласно уравнению (2.6) производительность вальцов непрерывного действия может быть определена, если положить $Z = \frac{z}{\sqrt{2Rh_0}}$ соответственно в месте отбора материала $X_k = X_{нк}$. В этом случае значение величины безразмерного комплекса Q^*Z может быть определено из выражения

$$Q^*Z = \frac{2Qz}{Uh_0^2R}. \quad (2.32)$$

В то же время производительность вальцов непрерывного действия можно выразить как отношение объема материала на валках V к продолжительности вальцевания τ_b . Тогда значение комплекса Q^*Z определится как

$$Q^*Z = \frac{2VL}{Uh_0^2R\tau_b}. \quad (2.33)$$

Величина объема материала на валках вальцов может быть найдена по уравнению (2.28). Совместное решение (2.32) и (2.33) позволяет определить производительность вальцов при непрерывном режиме их работы:

$$Q = \sqrt{\frac{Rh_0^3U(2Rh_0)^{\frac{1}{2}}}{\tau_b}} \phi_1. \quad (2.34)$$

Вследствие некоторой сложности вычисления функции ϕ_1 расчет производительности представляет определенные трудности. Как показано в работе [16], величину объема материала на валках вальцов, работающих по непрерывному режиму, можно вычислить по уравнению

$$V = 2h_0\sqrt{2Rh_0} \vartheta \times \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_0}}} (1 + X_k^2) - (1 + X_k^2)(X_k + X_n) + \left[X_n + X_k + \frac{1}{3}(X_n^3 + X_k^3) \right] \right\}. \quad (2.35)$$

Тогда производительность вальцов непрерывного действия может быть определена из выражения

$$Q = \frac{2h_0\sqrt{2Rh_0} \vartheta k(R/h_0, X_k, X_n)}{\tau_b}, \quad (2.36)$$

где

$$k = \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_0}}} (1 + X_k^2) \left[\frac{R}{h_0} + (1 + X_k^2)(X_k + X_n) + \left[X_n + X_k + \frac{1}{3}(X_n^3 + X_k^3) \right] \right]. \quad (2.37)$$

4 Определяем силовые и энергетические параметры процесса непрерывного вальцевания.

Величина распорного усилия вычисляется по уравнениям (2.15), (2.16) и (2.17). Значение технологической мощности, необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала определяется по формулам (2.24), (2.25) и (2.26) (см. прил. А, программа 1).

5 Находим мощность привода вальцов $N_d = \frac{N_r}{\eta_{пр}}$, кВт, где $\eta_{пр}$ – КПД привода машины (см. прил. Б, программа 3, 4).

6 Проводим прочностной расчет основных узлов и деталей машины (см. разд. 3, расчет валка – прил. В, программа 5).

7 Проводим тепловой расчет процесса вальцевания, для этого составляют уравнения теплового баланса (1.58).

3.4. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ВАЛКОВ ВАЛЬЦОВ И КАЛАНДРОВ

При работе валок вальцов и каландров подвергается воздействию распределенной нагрузки от собственной массы и распорных усилий в зазоре, крутящего момента при передаче вращения от электродвигателя. Для определения напряжений от изгиба и кручения, а также стрелы прогиба валка, необходимой для компенсации прогиба, рассчитывают моменты инерции и моменты сопротивления различных сечений валков. В валках, применяемых в современных валковых машинах, различают четыре основных вида поперечных сечений, которые приведены на рис. 3.16.

Сечение I характерно для бочки валка с центральной полостью и для цапф валка в местах установки подшипников. Сечения II, III характерны для бочки валка с периферийными сверлениями [17].

Для определения геометрических характеристик валков, изображенных на рис. 3.16, используются следующие формулы [18]:

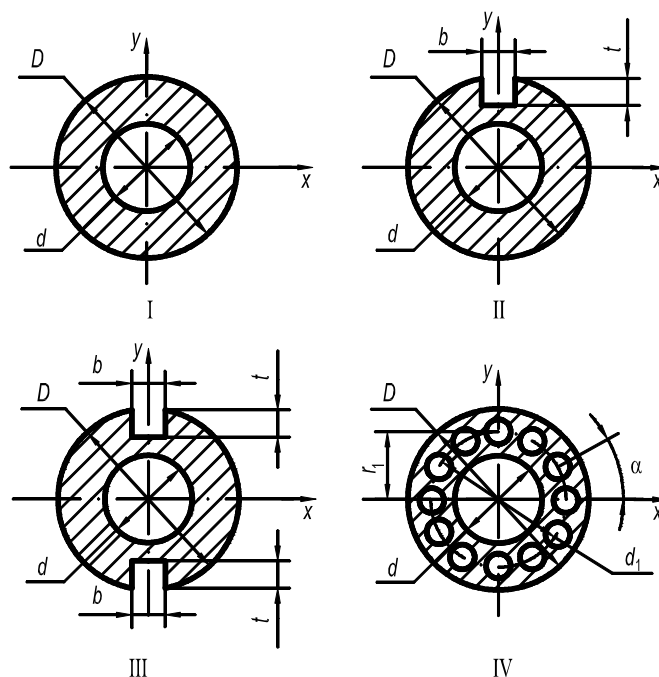


Рис. 3.16. Поперечные сечения валков

Сечение I:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]; \quad W_x = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right].$$

Сечение II:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{4};$$

$$W_x = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{2D}.$$

Сечение III:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{2};$$
$$W_x = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{D}.$$

Сечение IV:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \sum_{n=1}^k \left[\frac{\pi d_1^4}{64} + (r_1 |\sin(n-1)\alpha|)^2 \frac{\pi d_1^2}{4} \right];$$
$$W_x = \frac{2J_x}{D},$$

где $\alpha = \frac{360^\circ}{K}$; K – количество периферийных отверстий; d_1 – диаметр канала для подвода теплоносителя.

Общий вид валка показан на рис. 3.17, а. Он представляет собой балку кольцевого сечения со ступенчато изменяющейся жесткостью по длине. Валок симметричен относительно левой и правой опор. На консолях валка установлены шестерни, передающие крутящий момент, причем правая шестерня D_2 (рис. 3.17, а) является ведущей. Крутящий момент от правой шестерни через левую шестерню диаметром D_1 передается на ведомый валок. Схема передачи крутящего момента показана на рис. 3.18.

Крутящий момент от электродвигателя равен сумме крутящих моментов соответственно на ведущем и ведомом валках:

$$M_{кр} = m_{01}l_1 + m_{02}l_2, \quad (3.21)$$

Рис. 3.17. Валок и его расчетные схемы

д)

е)

ж)

з)

и)

к)

л)

м)

н)

о)

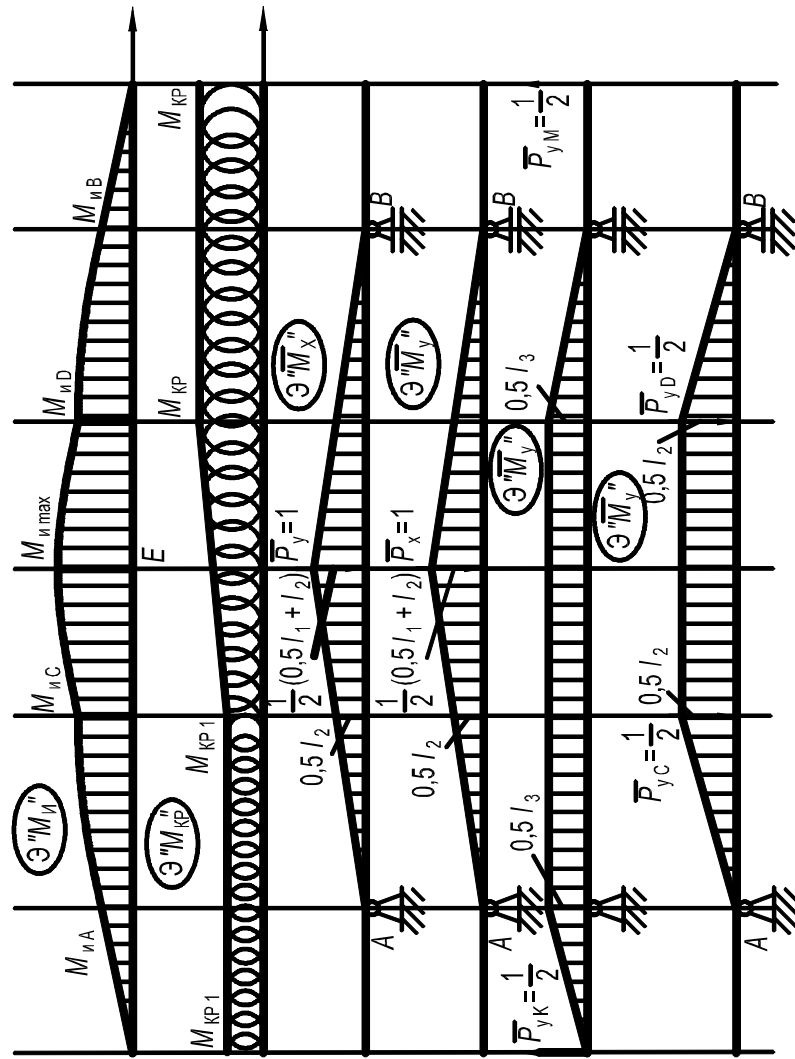


Рис. 3.17. Продолжение

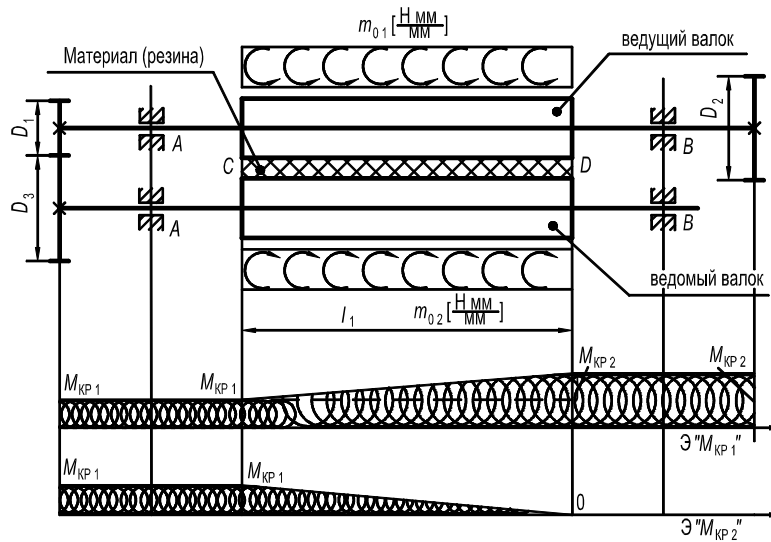


Рис. 3.18. Схема передачи крутящего момента между валками

где m_{01} , m_{02} – распределенные (погонные) крутящие моменты (Н·м/м) от сдвиговых усилий при деформации материала в зазоре между валками (рис. 3.18).

Сосредоточенные крутящие моменты на валках запишутся:

$$M_{кр1} = m_{01}l_1; \quad M_{кр2} = m_{02}l_2. \quad (3.22)$$

Крутящие моменты на валках соотносятся как диаметры зубчатых колес, передающих вращение с валка 1 на валок 2:

$$\frac{M_{кр1}}{M_{кр2}} = \frac{D_2}{D_3}, \quad (3.23)$$

где D_2 , D_3 – диаметры делительных окружностей шестерней D_2 и D_3 .

Помимо крутящего момента валок испытывает действие распределенной весовой нагрузки q_G от массы валка и распределенного распорного усилия q_P , возникающего при переработке материала. Полагая, что усилия q_G и q_P действуют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.17, б). На шестернях D_1 и D_2 возникают соответственно радиальные R_1 , R_2 и окружные P_1 , P_2 усилия, величины которых определяются по следующим формулам:

$$P_2 = \frac{2M_{кр2}}{D_2}; \quad P_1 = \frac{2M_{кр1}}{D_1}; \quad R_2 = P_2 \operatorname{tg} 20^\circ; \quad R_1 = P_1 \operatorname{tg} 20^\circ.$$

Расчетная схема валка вместе с действующими распределенными и сосредоточенными нагрузками показана на рис. 3.17, б.

3.4.1. Определение реакций в плоскости действия весовой нагрузки q_G (пл. YOZ)

$$\sum M_A = 0; V_B(2l_2 + l_1) - q_G l_1 \left(\frac{l_1}{2} + l_2 \right) + R_1 l_3 - R_2(l_1 + 2l_2 + l_3) = 0;$$

$$V_B = \frac{q_G l_1 (0,5l_1 + l_2) - R_1 l_3 + R_2(l_1 + 2l_2 + l_3)}{(2l_2 + l_1)};$$

$$\sum M_B = 0; q_G l_1 \left(\frac{l_1}{2} + l_2 \right) - R_2 l_3 + R_1(l_1 + 2l_2 + l_3) - V_A(2l_2 + l_1) = 0;$$

$$V_A = \frac{q_G l_1 (0,5l_1 + l_2) - R_2 l_3 + R_1(l_1 + 2l_2 + l_3)}{(2l_2 + l_1)}.$$

Проверка: $\sum Y = 0; -R_1 - R_2 - q_G l_1 + V_A + V_B \equiv 0$.

3.4.2. Определение реакций в плоскости действия распорного усилия q_P (пл. XOZ)

$$\sum M_A = 0; H_B = \frac{q_P l_1 (0,5l_1 + l_2) + P_2(l_1 + 2l_2 + l_3) - P_1 l_3}{(2l_2 + l_1)};$$

$$\sum M_B = 0; H_A = \frac{q_P l_1 (0,5l_1 + l_2) + P_1(l_1 + 2l_2 + l_3) - P_2 l_3}{(2l_2 + l_1)}.$$

Проверка: $\sum X = 0; -P_1 - P_2 - q_P l_1 + H_A + H_B \equiv 0$.

3.4.3. Построение эпюры изгибающих моментов от вертикальных сил (пл. YOZ)

$$M_{x_A} = -R_1 l_3; M_{x_C} = -R_1(l_2 + l_3) + V_A l_2;$$

$$M_{x_3} = -R_1(l_2 + l_3 + z_3) + V_A(l_2 + z_3) - q_G \frac{z_3^2}{2};$$

при $z_{03} = \frac{-R_1 + V_A}{q_G}$ имеем

$$M_{x_{\max E}} = -R_1 \left(l_2 + l_3 + \frac{V_A - R_1}{q_G} \right) + V_A \left(l_2 + \frac{V_A - R_1}{q_G} \right) - q_G \left(\frac{V_A - R_1}{q_G} \right)^2 \cdot \frac{1}{2};$$

$$M_{x_B} = -R_2 l_3; M_{x_D} = -R_2(l_2 + l_3) + V_B l_2.$$

Эпюра M_x приведена на рис. 3.17, в.

3.4.4. Построение эпюры изгибающих моментов M_y от горизонтальных сил (пл. XOZ)

$$M_{y_A} = -P_1 l_3; M_{y_C} = -P_1(l_2 + l_3) + H_A l_2;$$

$$M_{y_3} = -P(l_2 + l_3 + z_3) + H_A(l_2 + z_3) - q_P \frac{z_3^2}{2};$$

при $z_{01} = \frac{H_A - P_1}{q_P}$ имеем

$$M_{y_{\max E}} = -P_1 \left(l_2 + l_3 + \frac{H_A - P_1}{q_P} \right) + H_A \left(l_2 + \frac{H_A - P_1}{q_P} \right) - q_P \left(\frac{H_A - P_1}{q_P} \right)^2 \cdot \frac{1}{2};$$

$$M_{y_B} = -P_2 l_3; \quad M_{y_D} = -P_2 (l_2 + l_3) + H_B l_2.$$

Эпюра M_y приведена на рис. 3.19, *г*.

3.4.5. Построение суммарной эпюры изгибающих моментов $M_{\text{и}}$

Эпюра строится по формуле $M_{\text{и}} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$. (3.24)

$$M_{\text{и}A} = \sqrt{M_{x_A}^2 + M_{y_A}^2}; \quad M_{\text{и}C} = \sqrt{M_{x_C}^2 + M_{y_C}^2}; \quad M_{\text{и}B} = \sqrt{M_{x_B}^2 + M_{y_B}^2};$$

$$M_{\text{и}E_{\max}} = \sqrt{M_{x_{\max E}}^2 + M_{y_{\max E}}^2}; \quad M_{\text{и}D} = \sqrt{M_{x_D}^2 + M_{y_D}^2}.$$

Суммарная эпюра изгибающих моментов $M_{\text{и}}$ показана на рис. 3.17, *д*.

3.4.6. Построение эпюры крутящих моментов $M_{\text{кр}}$

$$M_{\text{кр}B} = M_{\text{кр}}; \quad M_{\text{кр}D} = M_{\text{кр}}; \quad M_{\text{кр}E} = \frac{M_{\text{кр}} + M_{\text{кр}1}}{2}; \quad M_{\text{кр}C} = M_{\text{кр}A} = M_{\text{кр}1}.$$

Эпюра крутящих моментов приведена на рис. 3.19, *е*.

3.4.7. Расчет на прочность сечения валка

Наиболее опасным сечением валка является сечение, примерно, в средней его части, точке *E*. Сечение валка испытывает сложное (плоское) напряженное состояние. Условие прочности по третьей теории прочности запишется [22]:

$$\sigma_3 = \frac{\sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{кр}}^2}}{W_0} \leq [\sigma], \quad (3.25)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение на изгиб при симметричном цикле изгиба для материала валка; W_0 – осевой момент сопротивления среднего сечения валка; τ – касательное напряжение в сечении валка от крутящего момента: $\tau = \frac{M_{\text{кр}E}}{2W_0}$; $M_{\text{кр}E}$ – крутящий момент в среднем сечении валка.

3.4.8. Расчет на жесткость валка

Будем считать, что максимальный прогиб валка возникает в его среднем сечении, т.е. при $z = \frac{l_1}{2}$.

Прогиб определяем энергетическим методом [22]. Жесткость валка по участкам l_1, l_2, l_3 изменяется по ступенчатому закону:

$$f_{\max} = \sum \frac{1}{E_i J_i} (\omega_i h_i), \quad (3.26)$$

где f_{\max} – максимальный (суммарный) прогиб валка

$$f_{\max} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq [f]; \quad (3.27)$$

ω_i – площадь эпюры изгибающих моментов на i -м участке; h_i – ордината единичной эпюры \bar{M} моментов, взятая под центром тяжести грузовой эпюры $M_{ги}$ на i -м участке; $E_i J_i$ – жесткость валка на i -ом участке;

$[f] = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м – допускаемый прогиб валка.

Для определения прогиба в среднем сечении валка прикладываем в этом сечении единичные силы $\bar{P}_y = 1$ и $\bar{P}_x = 1$ и строим от них единичные эпюры моментов $\bar{M}_{yE}; \bar{M}_{xE}$ (рис. 3.17, ж, з) и перемножаем каждую из них в отдельности на соответствующую грузовую эпюру моментов M_x и M_y (рис. 3.19, в, г) по способу Верещагина (3.26).

Для удобства перемножения эпюр M_x и M_y на единичные эпюры $\bar{M}_{yE}, \bar{M}_{xE}$ необходимо эпюры M_x и M_y расщелить на данном участке по формулам п. 3.4.3, 3.4.4.

Приведем окончательные выражения максимальных прогибов валка соответственно в двух плоскостях:

$$f_{x\max} = \frac{1}{EJ_1} \left\{ (H_A + H_B) \left[\frac{1}{2} l_2 l_1 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) + \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - (P_1 + P_2) \times \right. \\ \times \left[(l_2 + l_3) \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) \frac{1}{2} l_1 - \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - \frac{1}{24} q_P l_1^3 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{3}{16} l_1 \right) \left. \right\} + \frac{1}{EJ_2} \times \\ \times \left[(H_A + H_B) \frac{1}{6} l_2^3 - (P_1 + P_2) \left(\frac{1}{4} l_2^2 l_3 + \frac{1}{6} l_2^3 \right) \right]; \quad (3.28)$$

$$f_{y\max} = \frac{1}{EJ_1} \left\{ (V_A + V_B) \left[\frac{1}{2} l_2 l_1 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) + \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - (R_1 + R_2) \times \right. \\ \times \left[(l_2 + l_3) \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) \frac{1}{2} l_1 - \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - \frac{1}{24} q_G l_1^3 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{3}{16} l_1 \right) \left. \right\} + \frac{1}{EJ_2} \times \\ \times \left[(V_A + V_B) \frac{1}{6} l_2^3 - (R_1 + R_2) \left(\frac{1}{4} l_2^2 l_3 + \frac{1}{6} l_2^3 \right) \right]; \quad (3.29)$$

Аналогичным образом определяются прогибы валка в сечениях C и K . Эпюры единичных моментов \bar{M}_C и \bar{M}_K приведены на рис. 3.17, и, к.

Формулы прогибов для этих сечений имеют вид:

$$f_{xK} = \frac{1}{EJ_2} \left[- (P_1 + P_2) (l_2 + l_3) 0,25 l_1 l_3 + 0,5 (P_1 + P_2) 0,125 l_1^2 l_3 + \right. \\ \left. + 0,5 (H_A + H_B) 0,25 l_1 l_2 l_3 \right] + \frac{1}{EJ_1} \left[- \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (l_2 + l_3) 0,25 l_1 l_3 + \right. \\ \left. + 0,5 (P_1 + P_2) 0,125 l_1^2 l_3 + 0,5 (H_A + H_B) 0,25 l_1 l_2 l_3 + \frac{1}{2} (H_A + H_B) \times \right. \\ \left. \times 0,125 l_1 l_2 l_3 - \frac{1}{48} q_P l_1^3 l_3 \right] + \frac{1}{EJ_3} \left[- \frac{1}{2} (P_1 + P_2) \frac{1}{3} l_3^2 \right]; \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned}
f_{yK} = & \frac{1}{EJ_2} \left[-(R_1 + R_2)l_2 0,5l_3 - \frac{1}{2}(R_1 + R_2)0,5l_3l_2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2}(V_A + V_B)l_2 0,5l_3 \right] + \frac{1}{EJ_1} \left[-(R_1 + R_2)(l_2 + l_3)0,25l_3 + \right. \\
& \left. + 0,5(R_1 + R_2)0,125l_1^2l_3 + 0,5(V_A + V_B)0,25l_1l_2l_3 + \frac{1}{2}(V_A + V_B) \times \right. \\
& \left. \times 0,125l_1l_2l_3 - \frac{1}{48}q_G l_1^3l_3 \right] + \frac{1}{EJ_3} \left[-\frac{1}{2}(R_1 + R_2)\frac{1}{3}l_3^2 \right]; \quad (3.31)
\end{aligned}$$

$$f_K = \sqrt{f_{xK}^2 + f_{yK}^2} \leq [f].$$

$$\begin{aligned}
f_{xC} = & \frac{1}{EJ_1} \left[-(P_1 + P_2)(l_2 + l_3)0,25l_1l_2 + \frac{1}{2}(P_1 + P_2)0,125l_1^2l_2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2}(H_A + H_B)0,25l_1l_2^2 + \frac{1}{2}(H_A + H_B)0,125l_1l_2^2 - \frac{1}{48}q_P l_1^3l_3 \right] + \quad (3.32) \\
& \left. + \frac{1}{EJ_2} \left[-(P_1 + P_2)l_3 0,25l_2^2 - \frac{1}{6}(P_1 + P_2)l_2^2l_3 + \frac{1}{6}(H_A + H_B)l_2^3 \right]; \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{yC} = & \frac{1}{EJ_1} \left[-(R_1 + R_2)(l_2 + l_3)0,25l_1l_2 + \frac{1}{2}(R_1 + R_2)0,125l_1^2l_2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2}(V_A + V_B)0,25l_1l_2^2 + \frac{1}{2}(V_A + V_B)0,125l_1l_2^2 - \frac{1}{48}q_G l_1^3l_3 \right] + \quad (3.33) \\
& \left. + \frac{1}{EJ_2} \left[-(R_1 + R_2)l_3 0,25l_2^2 - \frac{1}{6}(P_1 + P_2)l_2^2l_3 + \frac{1}{6}(V_A + V_B)l_2^3 \right]; \right. \\
f_C = & \sqrt{f_{xC}^2 + f_{yC}^2} \leq [f].
\end{aligned}$$

3.4.9. Пример расчета валка вальцов (лабораторная установка)

Исходные данные: $D = d_1 = 0,16$ м; $d_2 = 0,095$ м; $d_3 = 0,080$ м; $d_0 = d = 0,040$ м; $D_1 = 0,15$ м; $D_2 = 0,5$ м; $D_3 = 0,13$ м; $l_1 = 0,32$ м; $l_2 = 0,11$ м; $l_3 = 0,115$ м; материал валка сталь – 40X; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $[\sigma]_{и} = 150$ МПа [21]; максимальное распорное усилие на валок $2P = 80$ кН = $8 \cdot 10^4$ Н, что соответствует распределенному усилию по длине рабочей части валка

$$q_p = \frac{2P}{l_1} = \frac{8 \cdot 10^4}{0,32} = 250 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

плотность материала валка $\gamma = 7,85 \cdot 10^4$ (Н/м³); $M_{кр} = 1580$ Н·м.

Вычисляем вес валка без учета его цапф:

$$G_1 = \left(\frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d_0^2}{4} \right) l_1 \gamma = 7,85 \cdot 10^4 \cdot (256 - 16) \cdot 10^{-4} \cdot 0,32 = 600 \text{ Н}.$$

Вычисляем вес цапфы валка:

$$G_2 = \left(\frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_0^2}{4} \right) l_2 \gamma = 7,85 \cdot 10^4 \cdot (70 - 16) \cdot 10^{-4} \cdot 0,11 = 46 \text{ Н}.$$

Распределенная нагрузка от веса валка составит: $q_G = \frac{G_1}{l_1} + 2 \frac{G_2}{l_2} = \frac{600}{0,32} + 2 \frac{46}{0,11} \approx 2700$ Н/м. Так как распределенная нагрузка от веса валка $q_G = 2700$ Н/м составляет примерно 1 % от распорной распределенной нагрузки $q_p = 250 \cdot 10^3$ Н/м, то при расчетах ее не учитывают и в формулах принимают $q_G = 0$. Суммарный крутящий момент $M_{кр}$ привода равен сумме крутящих моментов на ведущем и ведомом валке:

$$M_{кр} = M_{кр1} + M_{кр2},$$

где $M_{кр1} = m_{01}l_1$; $M_{кр2} = m_{02}l_2$. Здесь m_{01} и m_{02} – погонные крутящие моменты от сдвиговых усилий при деформации материала между ведущим и ведомым валками.

Крутящие моменты на валках соотносятся как диаметры зубчатых колес D_1 и D_3 :

$$\frac{M_{кр1}}{M_{кр2}} = \frac{D_1}{D_3} = \frac{150}{130} = 1,15 \text{ (коэффициент фрикции),}$$

где $D_1 = 150$ мм, $D_3 = 130$ мм – диаметры ведущего и ведомого валков.

Тогда, $M_{кр1} = 0,535M_{кр}$; $M_{кр2} = 0,465M_{кр}$.

Определим силы, действующие в зацеплении зубчатых колес D_1 и D_2 ведущего валка:

$$D_1 = \frac{2\dot{I}_{\text{в01}}}{D_1} = \frac{2 \cdot 0,535 \cdot 1580 \cdot 10^3}{150} = 11270 \text{ Н; } R_1 = P_1 \text{tg}20^\circ = 4100 \text{ Н;}$$

$$P_2 = \frac{2M_{\text{в02}}}{D_2} = \frac{2 \cdot 0,465 \cdot 1580 \cdot 10^3}{500} = 3100 \text{ Н; } R_2 = P_2 \text{tg}20^\circ = 1130 \text{ Н.}$$

Определяем реакции в опорах ведущего валка от вертикальных и горизонтальных сил:

$$V_A = 3800 \text{ Н; } V_B = 2060 \text{ Н; } H_A = 51\,000 \text{ Н; } H_B = 45\,200 \text{ Н.}$$

Определяем изгибающие и крутящие моменты в сечениях A , C , E :

$$M_{xA} = -R_1 l_3 = -4,1 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м; } M_{yA} = -P_1 l_3 = -11,25 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{xC} = -R_1(l_2 + l_3) + V_A l_2 = -3,83 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{yC} = -P_1(l_2 + l_3) + H_A l_2 = 34 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{xE} = -R_1(l_2 + l_3 + 0,5l_1) + V_A(l_2 + 0,5l_1) = -3,5 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{yE} = -P_1 \left(l_2 + l_3 + \frac{H_A - P_1}{q_p} \right) + H_A \left(l_2 + \frac{H_A - P_1}{q_p} \right) - q_p \frac{1}{2} \left(\frac{H_A - P_1}{q_p} \right)^2 = 68,5 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Суммарные изгибающие моменты в сечениях:

$$M_{UA} = \sqrt{M_{xA}^2 + M_{yA}^2} = \sqrt{(4,1 \cdot 10^5)^2 + (11,25 \cdot 10^5)^2} = 11,9 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{UC} = \sqrt{M_{xC}^2 + M_{yC}^2} = \sqrt{(3,83 \cdot 10^5)^2 + (34 \cdot 10^5)^2} = 36,2 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{UE} = \sqrt{M_{xE}^2 + M_{yE}^2} = \sqrt{(3,5 \cdot 10^5)^2 + (68,5 \cdot 10^5)^2} = 68,55 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Крутящие моменты в сечениях:

$$M_{крA} = 0,465M_{кр} = 7,35 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{крC} = 0,465M_{кр} = 7,35 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$M_{крE} \approx \frac{M_{кр} + M_{кр2}}{2} = 11,65 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Осевые и полярные моменты сопротивления сечений:

$$W_0^A = 5,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; W_0^C = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; W_0^E = 40 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$W_p^A = 10,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; W_p^C = 17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; W_p^E = 80 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Эквивалентные напряжения по третьей теории прочности:

$$\sigma_3^A = \frac{\sqrt{M_{UA}^2 + M_{крA}^2}}{W_0^A} = \frac{\sqrt{(11,9 \cdot 10^5)^2 + (7,35 \cdot 10^5)^2}}{5,12 \cdot 10^4} = 27,2 \text{ МПа} < [\sigma];$$

$$\sigma_3^C = \frac{\sqrt{M_{UC}^2 + M_{крC}^2}}{W_0^C} = \frac{\sqrt{(36,2 \cdot 10^5)^2 + (7,35 \cdot 10^5)^2}}{8,5 \cdot 10^4} = 43,5 \text{ МПа} < [\sigma];$$

$$\sigma_3^E = \frac{\sqrt{M_{UE}^2 + M_{крE}^2}}{W_0^E} = \frac{\sqrt{(68,5 \cdot 10^5)^2 + (11,6 \cdot 10^5)^2}}{40 \cdot 10^4} = 17 \text{ МПа} < [\sigma].$$

(3.34)

Здесь $[\sigma] = 150$ МПа.

Условие прочности сечений валка удовлетворяется.

3.4.10. Пример расчета на прочность и жесткость валка каландра (промышленный вариант)

Исходные данные: $D = d_1 = 0,61$ м; $d_2 = 0,43$ м; $d_3 = 0,36$ м; $d_0 = d = 0,15$ м; $l_1 = 1,71$ м; $l_2 = 0,27$ м; $l_3 = 0,445$ м.

Материал валка – чугун СЧ-15; $[\sigma]_н = 35$ МПа; $[\sigma]_р = 20$ МПа.

Максимальное распорное усилие на валке $P_1 = 2P = 75 \cdot 10^4$ Н.

Масса валка $G = 4810$ кг.

Модуль упругости материала валка $E = 1,3 \cdot 10^5$ МПа.

Коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Мощность привода для вращения двух валков определим по формуле [7]

$$N = \frac{P_1 v (1 + f)}{D^* \sqrt{\frac{R}{h_k}}}, \text{ Вт,}$$

где P_1 – распорное усилие на валок; v – окружная скорость медленно вращающегося валка, м/мин; $D^* = 10750$ – коэффициент, выбирается по [7, табл. 6]; $f = 1,17$ – фрикция; $R = 0,305$ м – радиус валка; $h_k = 0,002$ м – величина межвалкового зазора.

$$v = \omega R = 60 \frac{\pi n}{30} R \approx 0,1 \cdot 35 \cdot 0,305 \cdot 60 = 63,9 \text{ м/мин.}$$

$$N_T = \frac{75 \cdot 10^4 \cdot 63,9 \cdot (1 + 1,17)}{10750 \cdot \sqrt{\frac{305}{2}}} = 78,5 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 78,5 \text{ кВт.}$$

С учетом КПД привода ($\eta = 0,85$) получим

$$N = \frac{N_T}{\eta} = \frac{78,5}{0,85} = 92,5 \text{ кВт.}$$

Схема сил, действующих на валок каландра, представлена на рис. 3.19.

Полагаем, что силы в зацеплении зубчатых колес действуют в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для определения сил F_ϕ и F_n в зацеплении необходимо вычислить моменты, приложенные со стороны привода и со стороны фрикционной шестерни.

Момент со стороны привода

$$M_n = \frac{N}{\omega_2} = \frac{92,5 \cdot 10^3}{\frac{\pi n}{30}} \approx \frac{92,5 \cdot 10^3 \cdot 30}{3,14 \cdot 35} = 25,3 \cdot 10^3 \text{ Н·м.}$$

Момент привода распределяется на два валка. Принимаем окружные усилия сопротивления T обрабатываемой смеси на заднем валке, равными окружному усилию на переднем, т.е. моменты вращения заднего и переднего валков одинаковы: $M_1 = M_2 = M_C$:

$$N = M_1 \omega_1 + M_2 \omega_2 = M_C \omega_2 (1 + f),$$

следовательно: $M_C = \frac{N}{\omega_2 (1 + f)} = \frac{92,5}{3,5(1 + 1,17)} = 11,65 \cdot 10^3 \text{ Н·м.}$

Тогда окружное усилие сопротивления обрабатываемой смеси определяется

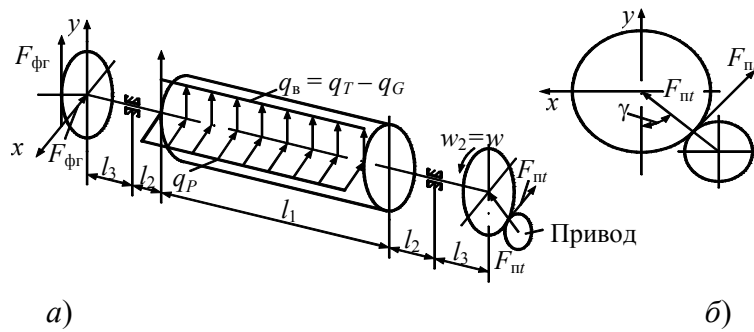


Рис. 3.19. Схема сил, действующих на валок

$$T = \frac{M_C}{R} = \frac{11,65 \cdot 10^3}{0,305} = 38 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Окружные усилия на приводной шестерне

$$F_{шт} = \frac{M_{шт}}{R_{шт}} = \frac{25,3 \cdot 10^3}{0,6} = 42 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

где $R_{шт} = 0,6 \text{ м}$ – радиус шестерни приводной.

Радиальные усилия на приводной шестерне:

$$F_{штр} = F_{шт} \operatorname{tg} \alpha = 42 \cdot 10^3 \cdot 0,365 = 15,4 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

где $\alpha = 20^\circ$ – угол зацепления зуба шестерни.

Окружные усилия на фрикционной шестерне вала

$$F_{\phi т} = \frac{M_C}{r_1},$$

где r_1 и r_2 – радиусы фрикционных шестерен переднего и заднего валков:

$$\frac{r_2}{r_1} = f = 1,17.$$

Расстояние между осями переднего и заднего валов при межвалковом зазоре $h_k = 2 \text{ мм}$:

$$A = D + h_k = 610 + 2 = 612 \text{ мм} = 0,612 \text{ м};$$

$$A = r_1 + r_2, \quad A = r_1(1 + f);$$

$$r_1 = \frac{A}{1 + f} = \frac{612}{1 + 1,17} = 282 \text{ мм} = 0,282 \text{ м};$$

$$F_{\phi т} = \frac{M_C}{r_1} = \frac{11,65 \cdot 10^3}{0,282} = 41,4 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Радиальное усилие на фрикционной шестерне

$$F_{\phi р} = F_{\phi т} \operatorname{tg} 20^\circ = 41,4 \cdot 10^3 \cdot 0,065 = 15,1 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Распределенная нагрузка от распорного усилия

$$q_P = \frac{P_1}{l_1} = \frac{75 \cdot 10^4}{1,71} = 440 \text{ кН/м.}$$

Распределенная нагрузка q_b от массы валка и силы сопротивления T (полагаем, что силы сопротивления и силы веса направлены в одну сторону, вниз)

$$q_b = -q_G - q_T = -\frac{48\,100}{1710} - \frac{38 \cdot 10^3}{1710} = -28\,000 - 22\,000 = -50 \text{ кН/м.}$$

В случае несовпадения q_G и q_T , т.е.

$$q_b = -q_G + q_T = -28\,000 + 22\,000 = 6 \text{ кН/м,}$$

значением этой нагрузки при расчетах можно пренебречь, так как она составляет $\frac{6}{440} \cdot 100\% = 1,35\% < 5\%$.

Крутящий момент на фрикционной шестерне определяется:

$$M_\phi = M_n - M_c = 25,3 \cdot 10^3 - 11,65 \cdot 10^3 = 13,65 \cdot 10^3 \text{ Н·м.}$$

Чтобы воспользоваться расчетными формулами, полученными в п. 3.4.9, для нагрузок, действующих на валках каландра, примем следующие обозначения (согласно рис. 3.16, б): $P_1 = F_{\phi r} = 15,1 \cdot 10^3 \text{ Н;}$

$$R_1 = -F_{\phi T} = -41,4 \cdot 10^3 \text{ Н; } P_2 = -F_{nr} = -15,4 \cdot 10^3 \text{ Н; } R_2 = -F_{nr} = -4,2 \cdot 10^3 \text{ Н; } q_x = q_P = 412 \text{ кН/м; } q_y = q_G = 432 \text{ кН/м.}$$

Как видно из рис. 3.19, наиболее нагруженным валком Г-образного каландра является валок 2 (приводной валок). На бочку валка (рис. 3.20, б), помимо его массы G , действуют распорные и касательные усилия со стороны соседних валков: $P_x = T - P_1$; $P_y = P_1 + T - G$.

Распределенные нагрузки по длине валка от горизонтальных и вертикальных сил запишутся:

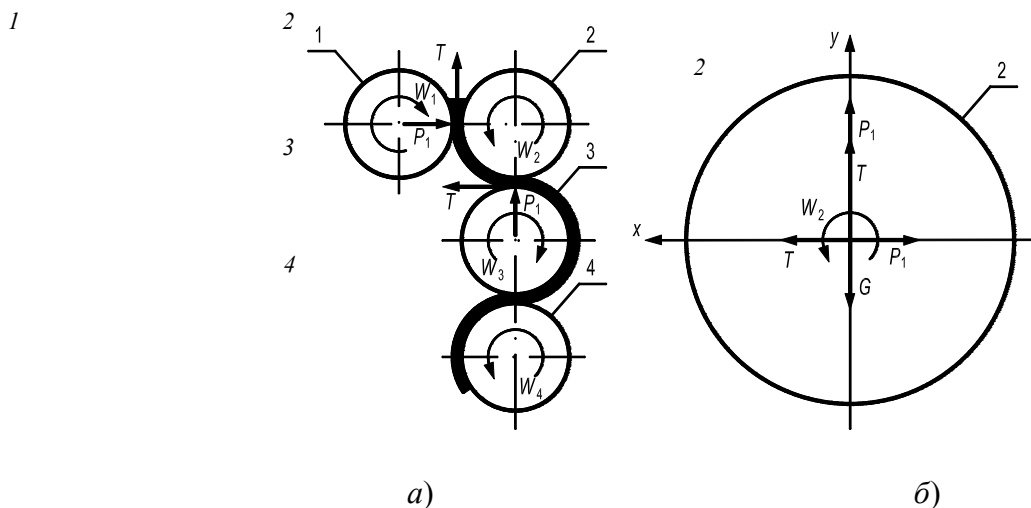


Рис. 3.20. Схема действия сил между валками каландра

$$q_P = q_X = \frac{P_X}{l_1} = \frac{T - P}{l_1} = \frac{3,8 \cdot 10^4 - 75 \cdot 10^4}{1710} = -412 \text{ кН/м;}$$

$$q_G = q_Y = \frac{P_Y}{l_1} = \frac{P_1 + T - G}{l_1} = \frac{75 \cdot 10^4 + 3,8 \cdot 10^4 - 4,8 \cdot 10^4}{1,71} = 432 \text{ кН/м.}$$

Общий вид и расчетная схема наиболее нагруженного валка каландра вместе с действующими распределенными и сосредоточенными нагрузками показаны на рис. 3.21, а, б.

Определение реакций в плоскости YOZ :

$$\sum M_{XA} = 0: V_B = \frac{q_G l_1 (0,5l_1 + l_2) + R_2 (l_1 + 2l_2 + l_3) - R_1 l_3}{(2l_2 + l_1)};$$

$$V_B = \frac{432 \cdot 1710 \cdot (0,5 \cdot 1710 + 270) - 42 \cdot 10^3 (1710 + 540 + 445) + 41,4 \cdot 10^3 \cdot 445}{(540 + 1710)} ;$$

$$V_B = 3,27 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

$$\sum M_{XB} = 0 : V_A = \frac{q_G l_1 (0,5 l_1 + l_2) + R_1 (l_1 + 2l_2 + l_3) - R_2 l_3}{(2l_2 + l_1)} ;$$

$$V_A = \frac{432 \cdot 1710 (0,5 \cdot 1710 + 270) - 41,4 \cdot 10^3 (1710 + 540 + 445) + 42 \cdot 10^3 \cdot 445}{(540 + 1710)} ;$$

$$V_A = 3,28 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Проверка: $\sum Y = 0 : -R_1 - R_2 - q_G l_1 + V_A + V_B = 0 ;$

$$1,4 \cdot 10^3 + 42 \cdot 10^3 - 738,72 \cdot 10^3 + 328 \cdot 10^3 + 327 \cdot 10^3 = 0 ; \quad 0 = 0 .$$

Определение реакций в плоскости XOZ :

$$\sum M_{YA} = 0 : H_B = \frac{q_P l_1 (0,5 l_1 + l_2) + P_2 (l_1 + 2l_2 + l_3) - P_1 l_3}{(2l_2 + l_1)} ;$$

$$H_B = \frac{412 \cdot 1710 (0,5 \cdot 1710 + 270) - 15,4 \cdot 10^3 (1710 + 540 + 445) + 15,4 \cdot 10^3 \cdot 445}{(540 + 1710)} ;$$

$$H_B = 3,31 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

$$\sum M_{YB} = 0 : H_A = \frac{q_P l_1 (0,5 l_1 + l_2) + P_1 (l_3 + l_1 + 2l_2) - P_2 l_3}{(2l_2 + l_3)} ;$$

$$H_A = \frac{412 \cdot 1710 (0,5 \cdot 1710 + 270) + 15,1 \cdot 10^3 (1710 + 540 + 445) + 15,4 \cdot 10^3 \cdot 445}{(540 + 1710)} ;$$

$$H_A = 3,73 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

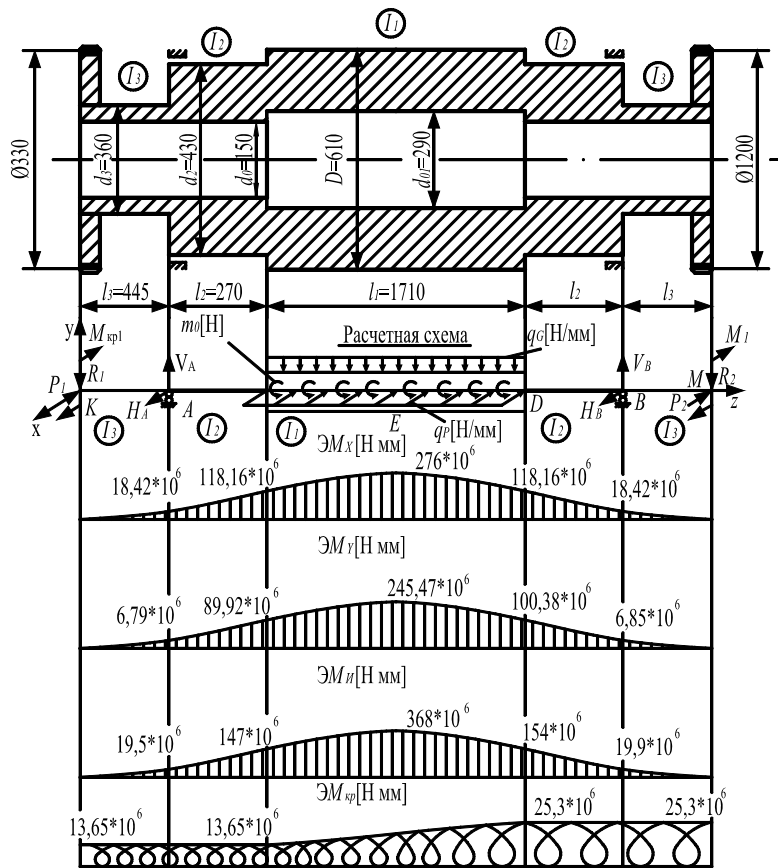


Рис. 3.21. Расчетная схема вала Г-образного каландра и эпюры напряжений

Проверка: $\sum X = 0: -P_1 - P_2 - q_P l_1 + H_A + H_B \equiv 0;$

$$-15,1 \cdot 10^3 + 15,4 \cdot 10^3 - 704,52 \cdot 10^3 + 331 \cdot 10^3 + 373 \cdot 10^3 = 0; 0 \equiv 0.$$

Построение эпюры изгибающих моментов от вертикальных сил (пл. YOZ):

$$M_{XA} = -R_1 l_3 = 41,4 \cdot 10^3 \cdot 445 = 18,42 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{XC} = -R_1 (l_2 + l_3) + V_A l_2 = 41,4 \cdot 10^3 \cdot 715 + 3,28 \cdot 10^5 \cdot 270 = 118,16 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{XC-D} = -R_1 (l_2 + l_3 + Z_3) + V_A (l_2 + Z_3) - q_G \frac{Z_3^2}{2};$$

при $Z_{03} = \frac{-R_1 + V_A}{q_G} = \frac{41,4 \cdot 10^3 + 328 \cdot 10^3}{432} = 0,855 \text{ м}$

$$M_{X(C-D)\max} = 41,4 \cdot 10^3 + 328 \cdot 10^3 \cdot 1125 - 432 \cdot \frac{855^2}{2} = 276 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{XB} = -R_2 l_3 = 42 \cdot 10^3 \cdot 445 = 18,69 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{XD} = -R_2 (l_2 + l_3) + V_B l_2 = 42 \cdot 10^3 \cdot 715 + 327 \cdot 10^3 \cdot 270 = 118,16 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Построение эпюры изгибающих моментов от горизонтальных сил (пл. XOZ):

$$M_{YA} = -P_1 l_3 = -15,1 \cdot 10^3 \cdot 445 = -6,719 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{YC} = -P_1 (l_2 + l_3) + H_A l_2 = -15,1 \cdot 10^3 \cdot 715 + 373 \cdot 10^3 \cdot 270 = 89,92 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{YC-D} = -P_1(l_2 + l_3 + Z_3) + H_A(l_2 + Z_3) - q_P \frac{Z_3^2}{2};$$

при $Z_0 = \frac{H_A - P_1}{q_P} = \frac{373 \cdot 10^5 - 15,1 \cdot 10^3}{412} = 0,868 \text{ м}$

$$M_{Y(C-D)\max} = -15,1 \cdot 10^3 \cdot 1583 + 373 \cdot 10^3 \cdot 1138 - 412 \cdot \frac{868^2}{2} =$$

$$= 245,47 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{YB} = -P_2 l_3 = 15,4 \cdot 10^3 \cdot 445 = 6,85 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{YD} = -P_2(l_2 + l_3) + H_B l_2 = 15,4 \cdot 10^3 \cdot 715 + 331 \cdot 10^3 \cdot 270 =$$

$$= 100,38 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Построение эпюры крутящих моментов $M_{кр}$:

$$M_{крK-C} = M_{кр1} = M_\phi = 13,65 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{крC-D} = M_{кр1} + m_0 Z; \quad 0 \leq Z \leq l_1 = 1,71 \text{ м};$$

$$Z = 0: M_{крC} = 13,65 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$Z = 1710: M_{крD} = 13,65 \cdot 10^3 + 11,65 \cdot 10^3 = 25,3 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

где $m_0 = \frac{M_C}{l_1} = \frac{11,65 \cdot 10^6}{1,71} = 6810 \text{ кН/м};$

$$M_{крD-M} = M_{кр1} + m_0 l_1 = 25,3 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Построение суммарной эпюры изгибающих моментов:

$$M_{и} = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2};$$

$$M_{иA} = \sqrt{(18,42 \cdot 10^6)^2 + (-6,719 \cdot 10^6)^2} = 19,5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{иC} = \sqrt{(118,16 \cdot 10^6)^2 + (89,92 \cdot 10^6)^2} = 147 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{и\max} \approx \sqrt{(276 \cdot 10^6)^2 + (245,47 \cdot 10^6)^2} = 368 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{иB} = \sqrt{(18,69 \cdot 10^6)^2 + (6,85 \cdot 10^6)^2} = 19,9 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{иD} = \sqrt{(118,16 \cdot 10^6)^2 + (100,38 \cdot 10^6)^2} = 154 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Осевые и полярные моменты инерции сопротивления сечений валка:

$$I_1 = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d_{01}}{D} \right)^4 \right] = \frac{3,14 \cdot 610^4}{64} \left[1 - \left(\frac{295}{610} \right)^4 \right] = 65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4;$$

$$I_2 = \frac{\pi d_2^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_2} \right)^4 \right] = \frac{3,14 \cdot 430^4}{64} \left[1 - \left(\frac{150}{430} \right)^4 \right] = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4;$$

$$I_3 = \frac{\pi d_3^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_3} \right)^4 \right] - \frac{bt(d_3 - t)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 360^4}{64} \left[1 - \left(\frac{150}{360} \right)^4 \right] -$$

$$- \frac{32 \cdot 10(360 - 10)^2}{4} = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4;$$

$$W_{01} = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad W_{02} = 3,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad W_{03} = 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$W_{P1} = 21,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad W_{P2} = 7,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad W_{P3} = 4,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Проверим условие прочности наиболее опасных сечений участков валка по третьей теории прочности:

$$\sigma_3^{\text{III}} = \frac{\sqrt{M_{и}^2 + M_{кр}^2}}{W_0} \leq [\sigma],$$

где $[\sigma] = 40 \text{ МПа}$ – допускаемое напряжение для материала валка чугун СЧ 15 при пульсирующем цикле.

$$\sigma_3^B = \frac{\sqrt{M_{иB}^2 + M_{крB}^2}}{W_{03}} = \frac{\sqrt{(19,9 \cdot 10^6)^2 + (25,3 \cdot 10^6)^2}}{2,26 \cdot 10^6} = \frac{32,1 \cdot 10^6}{2,26 \cdot 10^6} =$$

$$= 14,2 \text{ МПа} \leq [\sigma];$$

$$\sigma_3^D = \frac{\sqrt{M_{иD}^2 + M_{крD}^2}}{W_{02}} = \frac{\sqrt{(154 \cdot 10^6)^2 + (25,3 \cdot 10^6)^2}}{3,72 \cdot 10^6} = \frac{158,5 \cdot 10^6}{3,72 \cdot 10^6} =$$

$$= 42,8 \text{ МПа} \leq [\sigma];$$

$$\sigma_3^E = \frac{\sqrt{M_{иE}^2 + M_{крE}^2}}{W_{01}} = \frac{\sqrt{(368 \cdot 10^6)^2 + (19,475 \cdot 10^6)^2}}{10,7 \cdot 10^6} = \frac{368 \cdot 10^6}{10,7 \cdot 10^6} =$$

$$= 34,4 \text{ МПа} \leq [\sigma].$$

Перенапряжение в сечении D составляет

$$\frac{42,8 - 40}{42,8} 100 \% = 6,55 \%$$

Проверяем валок на жесткость. Условие жесткости имеет вид

$$f_{\max E} = \sqrt{f_{XE}^2 + f_{YE}^2} \leq [f],$$

где $[f] = 0,25$ мм – допускаемый прогиб бочки валка.

$$\begin{aligned} f_{x\max} &= \frac{1}{EI_1} \left\{ (H_A + H_B) \left[\frac{1}{2} l_1 l_2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) + \frac{1}{8} l_1^2 \left(0,5 l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - (P_1 + P_2) \times \right. \\ &\times \left[(l_2 + l_3) \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) \frac{1}{2} l_1 - \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - \frac{1}{24} q_P l_1^3 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{3}{16} l_1 \right) \left. \right\} + \\ &+ \frac{1}{EI_2} \left[(H_A + H_B) \frac{1}{6} l_2^3 - (P_1 + P_2) \left(\frac{1}{4} l_2^2 l_3 + \frac{1}{6} l_2^3 \right) \right] = \frac{1}{1,3 \cdot 10^5 \cdot 65 \cdot 10^8} \times \\ &\times \left\{ (3,73 \cdot 10^5 + 3,31 \cdot 10^5) \left[\frac{1}{2} \cdot 1710 \cdot 270 \left(\frac{1}{2} \cdot 270 + \frac{1}{8} \cdot 1710 \right) + \frac{1}{8} \cdot 1710^2 \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left(0,5 \cdot 270 + \frac{1}{6} \cdot 1710 \right) \right] - (15,1 \cdot 10^3 - 15,4 \cdot 10^3) \times \right. \\ &\times \left. \left[(270 + 445) \left(\frac{1}{2} \cdot 270 + \frac{1}{8} \cdot 1710 \right) \times \frac{1}{2} \cdot 1710 - \frac{1}{8} \cdot 1710^2 \left(\frac{1}{2} \cdot 270 + \frac{1}{6} \cdot 1710 \right) \right] \times \right. \\ &\times \left. \frac{1}{2} \cdot 1710 - \frac{1}{8} \cdot 1710^2 \left(\frac{1}{2} \cdot 270 + \frac{1}{6} \cdot 1710 \right) \right] - \frac{1}{24} \cdot 412 \cdot 1710^3 \times \\ &\times \left. \left(\frac{1}{2} \cdot 270 + \frac{3}{16} \cdot 1710 \right) \right\} + \frac{1}{1,3 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^8} \left[(3,73 \cdot 10^5 + 3,31 \cdot 10^5) \frac{1}{6} 270^3 - \right. \\ &\left. - (15,1 \cdot 10^3 - 15,4 \cdot 10^3) \left(\frac{1}{4} 270^2 \cdot 445 + \frac{1}{6} 270^3 \right) \right] = 0,150 + 0,011 = \\ &= 0,161 \text{ мм} = 0,161 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{y\max} &= \frac{1}{EI_1} \left\{ (V_A + V_B) \left[\frac{1}{2} l_2 l_1 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) + \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - (R_1 + R_2) \times \right. \\ &\times \left[(l_2 + l_3) \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{8} l_1 \right) \frac{1}{2} l_1 - \frac{1}{8} l_1^2 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{1}{6} l_1 \right) \right] - \frac{1}{24} q_G l_1^3 \left(\frac{1}{2} l_2 + \frac{3}{16} l_1 \right) \left. \right\} + \\ &+ \frac{1}{EI_2} \left[(V_A + V_B) \frac{1}{6} l_2^3 - (R_1 + R_2) \left(\frac{1}{4} l_2^2 l_3 + \frac{1}{6} l_2^3 \right) \right] = \frac{1}{84,5 \cdot 10^{13}} \left\{ (3,28 \cdot 10^5 + \right. \\ &+ 3,27 \cdot 10^5) 2,338 \cdot 10^8 - (-41,4 \cdot 10^3 - 42 \cdot 10^3) 0,897 \cdot 10^3 - 90 \cdot 10^9 \cdot 445,62 \left. \right\} + \\ &+ \frac{1}{20,8 \cdot 10^{13}} \left[(3,28 \cdot 10^5 + 3,27 \cdot 10^5) \cdot 3,28 \cdot 10^6 - (-41,4 \cdot 10^3 - 42 \cdot 10^3) \times \right. \\ &\times \left. 11,38 \cdot 10^6 \right] = 0,138 + 0,015 = 0,152 \text{ мм} = 0,152 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\max E} &= \sqrt{f_{x\max E}^2 + f_{y\max E}^2} = 10^{-3} \cdot \sqrt{0,161^2 + 0,152^2} = 0,221 \cdot 10^{-3} < [f] = \\ &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

Определим прогиб бочки валка на краю, в точке C:

$$\begin{aligned}
 f_{xC} &= \frac{1}{EI_1} \left[-(P_1 + P_2)(l_2 + l_3)0,25l_1l_2 + 0,5(P_1 + P_2)0,125l_1^2l_2 + \right. \\
 &+ 0,5(H_A + H_B)0,25l_2^2l_1 + \frac{1}{2}(H_A + H_B)0,125l_2^2l_1 - \frac{1}{48}q_P l_1^3l_2 \left. \right] + \\
 &+ \frac{1}{EI_2} \left[-(P_1 + P_2)l_3 \frac{1}{4}l_2^2 - \frac{1}{6}(P_1 + P_2)l_2^2l_3 + \frac{1}{6}(H_A + H_B)l_2^3 \right] = \\
 &= \frac{1}{84,5 \cdot 10^{13}} \left[-(15,1 \cdot 10^3 - 15,4 \cdot 10^3)715 \cdot \frac{1}{4} \cdot 1710 \cdot 270 + \frac{1}{2} \times \right. \\
 &\times (15,1 \cdot 10^3 - 15,4 \cdot 10^3) \frac{1}{8} \cdot 1710^2 \cdot 270 + 0,5(3,73 \cdot 10^5 + 3,31 \cdot 10^5) \times \\
 &\times \frac{1}{8} 270^2 \cdot 1710 - \frac{1}{48} 412 \cdot 1710^3 \cdot 270 \left. \right] + \frac{1}{20,8 \cdot 10^{13}} \left[-(-0,3 \cdot 10^3)445 \cdot \frac{1}{4} \times \right. \\
 &\times 270^2 - \frac{1}{6}(-0,3 \cdot 10^3)270^2 \cdot 445 + \frac{1}{6}(3,73 \cdot 10^5 + 3,71 \cdot 10^5)270^3 \left. \right] = \\
 &= 0,0057 + 0,0011 = 0,0068 \text{ мм} = 0,0068 \cdot 10^{-3} \text{ м}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{yC} &= \frac{1}{EI_1} \left[-(R_1 + R_2)(l_2 + l_3)0,5l_10,5l_2 + 0,5(R_1 + R_2)0,125l_1l_1l_2 + \right. \\
 &+ 0,5(V_A + V_B)l_2^20,25l_1 + \frac{1}{2}(V_A + V_B)0,125l_2^2l_1 - \frac{1}{48}q_G l_1^3l_2 \left. \right] + \\
 &+ \frac{1}{EI_2} \left[-(R_1 + R_2) \frac{1}{4}l_3l_2^2 - \frac{1}{2}(R_1 + R_2) \frac{1}{3}l_2^2l_3 + \frac{1}{6}l_2^3(V_A + V_B) \right] = \\
 &= \frac{1}{84,5 \cdot 10^{13}} \left[-(-41,4 \cdot 10^3 - 42 \cdot 10^3) \cdot 82,5 \cdot 10^6 + (-83,4 \cdot 10^3) \cdot 49,34 \cdot 10^6 + \right. \\
 &+ (3,28 \cdot 10^5 - 3,27 \cdot 10^5) \cdot 15,58 \cdot 10^6 + (3,28 \cdot 10^5 + 3,27 \cdot 10^5) \cdot 7,79 \cdot 10^6 - \\
 &- 1,214 \cdot 10^{13} \left. \right] + \frac{1}{20,8 \cdot 10^{13}} \left[83,4 \cdot 10^3 \cdot 445 \cdot \frac{1}{4} \cdot 270^2 + 83,4 \frac{1}{6} 270^2 + \right. \\
 &+ 6,55 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{6} \cdot 270^3 \left. \right] = 0,007 + 0,0156 = 0,023 \text{ мм} = \\
 &0,023 \cdot 10^{-3} \text{ м};
 \end{aligned}$$

$$f_C = 10^{-3} \sqrt{0,0068^2 + 0,023^2} = 0,024 \cdot 10^{-3} \text{ м} \leq [f].$$

Жесткость валка Г-образного каландра обеспечена.

4. ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНИН ВАЛЬЦОВ

4.1. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАНИНЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ВАЛЬЦОВ С МАКСИМАЛЬНЫМ УСИЛИЕМ 40 кН

Ранее было отмечено (п. 3.1), что задачей проводимых расчетов станин вальцов является не только определение напряжений во всей конструкции на стадии проектирования, но и создание равнопрочных конструкций, обеспечивающих минимальную металлоемкость.

Если в большинстве сечений станины напряжения одинаковы и не превышают допустимых, то задача проектирования равнопрочной конструкции решена. Если нет – то размеры конструкции станины еще раз уточняются.

Как показали проверочные расчеты станины вальцов, не все участки рамы работают по напряжениям одинаково: значительно недогружены верхняя траверса и нижнее основание. Поэтому возникает необходимость проведения окончательных расчетов по оптимизации конструктивных параметров элементов станины, чтобы удовлетворялись все проектные требования, такие как ограничения, накладываемые на напряжения, прогибы и геометрию конструкции при ее наименьшей массе.

Для решения поставленной задачи используем хорошо зарекомендовавший себя на практике математический аппарат оптимизации – метод скользящего допуска (МСД) [23].

Задача весовой оптимизации для станины вальцов (рис. 3.4) может быть сформулирована следующим образом: из заданных условий максимального распорного усилия между валками, допустимых напряжений для материала станины и прогиба валков найти такие значения толщин H_1 , H_2 , и H_3 сечений рамы (рис. 3.4), чтобы объем материала системы был минимальным, т.е.:

$$V(H^*) = \min V(H), H \in D; \quad (4.1)$$

$$D = \{H: \sigma_{i\max}(H) \leq [\sigma]_i; f^i_{\max}(H) \leq [f]_i; a_i \leq H_i \leq b_i; i = 1, 2, 3\}. \quad (4.2)$$

Здесь $V(H^*)$ – объем (масса) конструкции станины; a_i, b_i – наибольший и наименьший размеры сечений станины; $[\sigma]_p, [\sigma]_и$ – допустимые напряжения для материала станины при растяжении и изгибе, соответственно; $[f]_i$ – допустимый прогиб валка, равный допустимой величине разнотолщинности получаемого изделия; $\sigma^i_j(H_i)$ – эквивалентные напряжения для материала по принятой гипотезе прочности; D – допустимая область проектных решений.

В качестве искомых проектных параметров станины вальцов принимаем: ширину сечения вертикальных стоек H_1 ; высоту сечения нижнего основания H_2 ; высоту сечения траверсы H_3 (рис. 3.4), остальные размеры сечений связаны между собой следующими соотношениями: $b_1 = 0,64H_1$; $b_2 = 1,45H_2$; $b_3 = H_3$.

При этом в расчетах приняты следующие ограничения на размеры проектных параметров:

$$0,055 \leq H_1 \leq 0,125 \text{ м}; \quad 0,055 \leq H_2 \leq 0,125 \text{ м}; \quad 0,055 \leq H_3 \leq 0,125 \text{ м}.$$

Система уравнений по ограничению прочности принималась в виде:

$$\frac{\sigma_{1\max}}{[\sigma]_{и}} - 1 \leq 0; \quad \frac{\sigma_{2\max}}{[\sigma]_{и}} - 1 \leq 0; \quad \frac{\sigma_{3\max}}{[\sigma]_p} - 1 \leq 0.$$

Максимальные напряжения $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$, $\sigma_{3\max}$ соответственно в боковых стойках, в нижнем поясе и траверсе определялись по формулам:

$$\sigma_{1\max} = \frac{0,5x_1h_1}{W_1}; \quad \sigma_{2\max} = \frac{(0,5P - x_1)h_1}{W_2}; \quad \sigma_{3\max} = \frac{0,485Pc}{W_3} + \frac{0,485P}{F_3},$$

где $P = 0,4 \cdot 10^5$ Н – распорное усилие; $x_1 = 0,485 \cdot P$; $c = 0,0275$ м.

Функция минимального объема станины вальцов имеет вид:

$$V(H_1, H_2, H_3) = 2 \cdot 2 \cdot h_1 \cdot 0,64 \cdot H_1^2 + 1 \cdot 1,45 \cdot H_2^2 + 1 \cdot H_3^2.$$

Для получения проекта минимального объема используется МСД при следующих данных: размер шага вычислений $t = 0,01$ м; начальная стартовая точка $H_1^{(0)} = 0,105$ м; $H_2^{(0)} = 0,080$ м; $H_3^{(0)} = 0,080$ м; число, определяющее окончание процесса поиска оптимального решения $\varepsilon = 0,3$.

В результате решения поставленной задачи на ПЭВМ с использованием программы 6 (прил. Г) [24] получены следующие значения оптимальных проектных параметров станины вальцов:

$$H_1^* = 0,080 \text{ м}; \quad H_2^* = 0,055 \text{ м}; \quad H_3^* = 0,061 \text{ м}.$$

Минимальный объем (масса) станины составил $V_{\min} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ($M = 54,6$ кг), что более чем в 2 раза меньше объема станины, полученного из расчета по допускаемым напряжениям, который составил $V_{[\sigma]} = 14,99 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ($M = 116,5$ кг).

Вывод. Масса оптимальной конструкции в 2 раза меньше массы существующей конструкции станины лабораторных вальцов, рассчитанной по допускаемым напряжениям в наиболее опасных сечениях.

4.2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАНИНЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВАЛЬЦОВ С РАСПОРНЫМ УСИЛИЕМ 1000 кН

Общий вид конструкции станины промышленных вальцов приведен на рис. 3.1. Данная конструкция разработана на заводе "Тамбовполимермаш" и представляет собой литую станину двутаврового сечения, отлитую из стали марки сталь 45Л, боковые стойки и горизонтальная поперечина в сечении имеют симметричный двутавр, траверса также выполнена в виде двутавра с разной шириной полок. Размеры и форма сечений станины приведены на рис. 4.1, а – в.

Следует отметить, что сечение Н-образной рамы имеет одинаковые размеры и форму, т.е. $J_1 = J_2$.

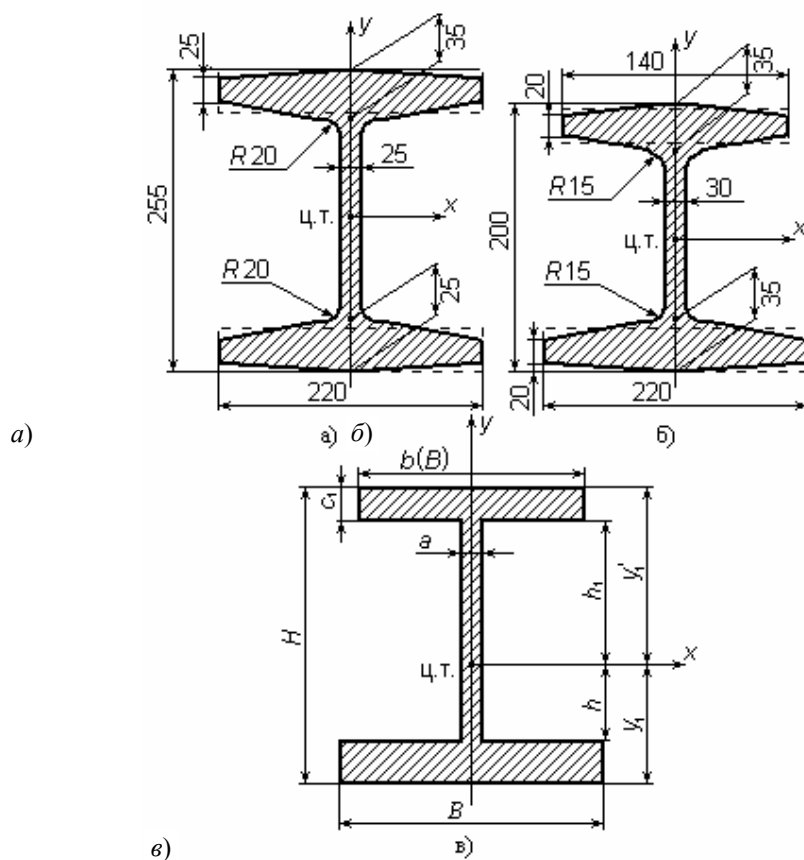


Рис. 4.1. Форма сечений рамы

Для удобства вычисления геометрических характеристик сечений рамы заменим горизонтальные верхние и нижние полки двутавра на прямоугольники. В результате получим приведенное сечение двутавра (рис. 4.1, в). Тогда, имея приведенное сечение двутавра, получим в общем виде следующие геометрические характеристики [18].

Момент инерции относительно оси X :

$$J_X = \frac{1}{3}(By_1^3 - B_1h^3 + by_1^3 - b_1h_1^3). \quad (4.3)$$

Моменты сопротивления:

для верхних волокон

$$W_X^B = \frac{J_X}{y_1'}; \quad (4.4)$$

для нижних волокон

$$W_X^H = \frac{J_X}{y_1}. \quad (4.5)$$

Площадь сечения:

$$F = bc_1 + a(h + h_1) + Bc. \quad (4.6)$$

Центр тяжести сечения:

$$y_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{aH^2 + B_1c^2 + b_1c_1(2H - c_1)}{aH + B_1c + b_1c_1},$$

где $b_1 = b - a$; $B_1 = B - a$; $y_1' = H - y_1$; $h = y_1 - c$; $h_1 = y_1' - c_1$.

Подставляя в формулы (4.3) – (4.6) размеры, приведенные на рис. 4.1, а, б, получим:

для вертикальных стенок: $J_1 = 245 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$; $F_1 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $W_1^B = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $W_1^H = 1,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $H_1 = 0,25 \text{ м}$; $B_1 = 0,22 \text{ м}$.

для горизонтальной перекладины: $J_2 = J_1$; $F_2 = F_1$; $W_2^B = W_1^B$; $W_2^H = W_1^H$; $H_2 = H_1$; $B_2 = B_1$.

для траверсы: $J_3 = 33,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$; $F_3 = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $W_3^B = 0,276 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $W_3^H = 0,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $H_3 = 0,1925 \text{ м}$; $B_3 = 0,22 \text{ м}$; $b_3 = 0,140 \text{ м}$.

Исходные данные для расчета станины вальцов (промышленный вариант): $h_1 = 0,435l$; $h_2 = 0,333l$; $l = 1,520 \text{ м}$; $J_2 = J_1 = 245 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$; $J_3 = 33,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$; $P = 1000 \text{ кН}$; материал – сталь 45Л; $[\sigma]_{\text{н}} = 150 \text{ МПа}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ [20].

Согласно рис. 4.2, а данная рама станины вальцов трижды статически неопределима. Учитывая формулы (3.5) – (3.7) и полагая $k = 0$, для нашего случая получим следующие значения неизвестных усилий: $x_1 = -0,004Pl$; $x_2 = -0,885P$; $x_3 = 0,362P$.

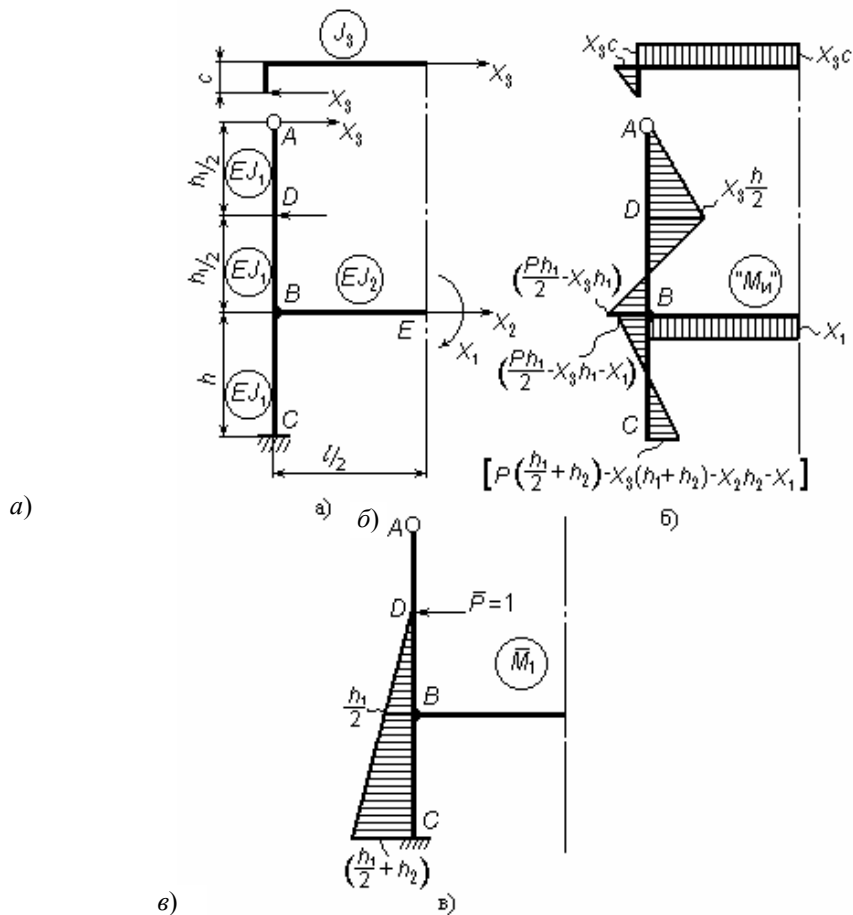


Рис. 4.2. Эпюра моментов для рамы

Окончательная эпюра изгибающих моментов для рамы приведена на рис. 4.2, б (ввиду симметрии рамы показана ее половина).

Напряжения в опасных участках рамы определяются по формуле (3.8):

а) траверса
$$\sigma_{3\max} = \sigma_{\text{тр}} = \frac{x_3 c}{W_3^B} + \frac{x_3}{F_3} \leq [\sigma],$$

где $c = 0,0875$ м; $W_3^B = 0,276 \cdot 10^{-3}$ м³; $F_3 = 14 \cdot 10^{-3}$ м²; $x_3 = 0,362P$; $P = 10^6$ Н.

$$\sigma_{\text{тр}} = 115 + 25,8 = 143,8 \text{ МПа} < [\sigma]_{\text{н}} = 150 \text{ МПа}.$$

б) Н-образная стойка.

Сечение D:

$$\sigma_{1\max} = \sigma_D = \frac{M_n^D}{W_1^H} = \frac{x_3 \frac{h_1}{2}}{W_1^H} = \frac{120 \cdot 10^6}{1,77 \cdot 10^6} = 68 \text{ МПа} < [\sigma]_{\text{н}}. \quad (4.7)$$

Сечение E:

$$\sigma_{2\max} = \sigma_E = \frac{M_n^E}{W_2^E} + \frac{x_2}{F_2} = \frac{x_1}{W_2} + \frac{x_2}{F_2} = 3,9 + 55 = 58,9 \text{ МПа} < [\sigma]_{\text{н}}. \quad (4.8)$$

Сечение B:

$$\sigma_{4\max} = \sigma_B = \frac{M_n^B}{W_1^H} = \frac{0,056Pl}{W_1^H} = 48 \text{ МПа} < [\sigma]_{\text{н}}. \quad (4.9)$$

Абсолютный прогиб рамы в точке приложения силы P определяется путем перемножения единичной эпюры моментов (рис. 4.2, в) на эпюру моментов от заданных сил (рис. 4.2, б):

$$f_D = \frac{1}{EI_1} \left[-x_3 \frac{h_1^3}{16} - x_3 \frac{h_1^3}{24} + \frac{Ph_1^3}{24} - x_3 h_1 h_2 (2h_2 + h_1) \frac{1}{4} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} x_3 h_2^2 \left(\frac{h_1}{2} + 2h_2 \right) + Ph_1 h_2 \left(h_2 + \frac{h_1}{2} \right) \frac{1}{4} + \frac{1}{2} Ph_2^2 \left(\frac{h_1}{2} + 2h_2 \right) - \right]$$

$$-\frac{1}{2}x_2h_2^2\left(\frac{h_1}{2}+2h_2\right)-\frac{1}{2}x_1h_2\left(h_2+\frac{h_1}{2}\right)-\frac{1}{2}x_1h_2\left(h_2+\frac{h_1}{2}\right)+\frac{x_3l/2}{EF_3}+\frac{x_2l/2}{EF_2}\leq[f], \quad (4.10)$$

где $[f]$ – допустимый прогиб для рамы, $[f] = 0,001$ м.

$f_D = 0,000384$ м $< [f] = 0,001$ м, т.е. жесткость станины вальцов обеспечена.

Результаты расчетов по допустимым напряжениям показали, что не все участки станины вальцов испытывают напряжения, равные допустимым. Это говорит о том, что метод расчета конструкций по допустимым напряжениям не дает возможности получить равнопрочную конструкцию, что приводит в целом к значительному расходу металла, а, следовательно, к утяжелению массы станины.

Для получения конструкции станины вальцов минимальной массы с равнопрочными элементами проведем оптимизацию конструктивных параметров станины. В качестве искоемых параметров станины принимаем: высоту сечения траверсы H_3 , высоту сечения ригеля (горизонтальная переключина) H_2 и ширину сечения стойки H_1 (рис. 4.2.). Все остальные параметры двутаврового профиля являются функциями параметров H_i ($i = 1, 2, 3$) (рис. 4.3, а – в).

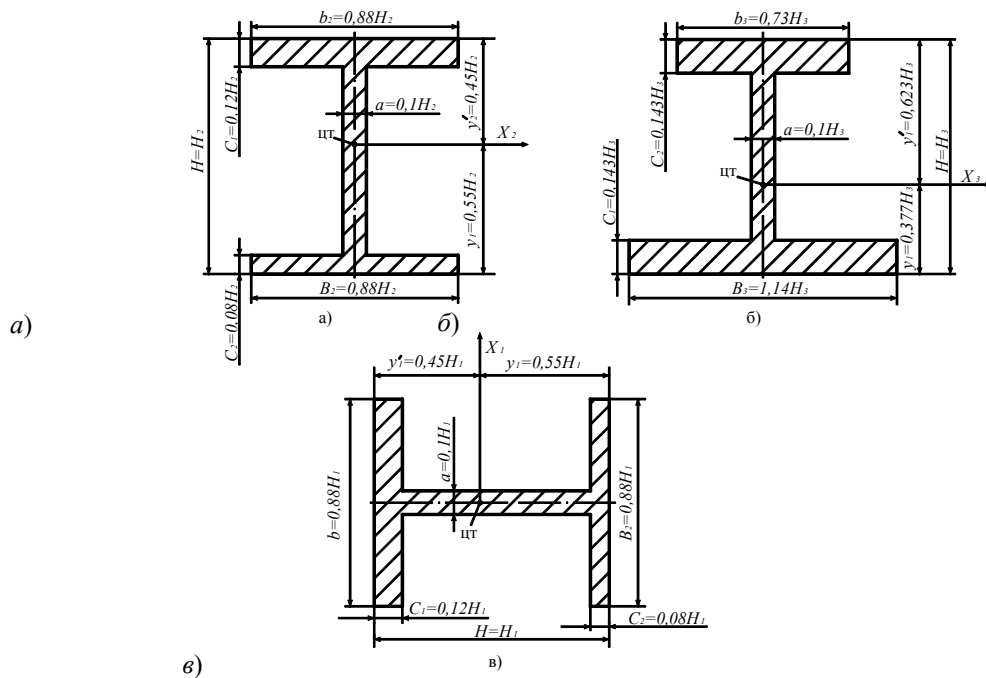


Рис. 4.3. Форма сечений рамы

При этом в расчетах приняты следующие ограничения на размеры проектных параметров:

$$0,1 \leq x_1 \leq 0,2 \text{ м}; \quad 0,1 \leq x_2 \leq 0,2 \text{ м}; \quad 0,1 \leq x_3 \leq 0,2 \text{ м}.$$

Система уравнений для ограничения прочности имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_{1\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0; \\ \frac{\sigma_{2\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0; \\ \frac{\sigma_{3\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0; \\ \frac{\sigma_{4\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0, \end{array} \right.$$

ГДЕ $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$, $\sigma_{3\max}$, $\sigma_{4\max}$ – максимальные напряжения соответственно в стойках, нижнем поясе рамы и траверсе, определенные из уравнений (4.7) – (4.9):

$$\begin{aligned} \sigma_{1\max} = \sigma_D &= \frac{0,0785Pl}{0,112H_1^3}; \\ \sigma_{2\max} = \sigma_E &= \frac{0,004Pl}{0,112H_2^3} + \frac{0,885P}{0,2665H_2^2}; \\ \sigma_{3\max} = \sigma_{тр} &= \frac{0,362Pc}{0,0386H_3^3} + \frac{0,362P}{0,378H_3^2}; \\ \sigma_{4\max} = \sigma_B &= \frac{0,056Pl}{W_1^H}. \end{aligned}$$

Функция минимального объема станины вальцов запишется:

$$V(H_1, H_2, H_3) = 2 \cdot 0,2565H_1^2(h_1 + h_2) + 0,2565H_2^2l + 0,378H_3^2l.$$

Как и при расчете лабораторных вальцов для получения проекта минимального объема использовался метод МСД при следующих данных: шаг $t = 0,005$ м; начальная стартовая точка $H_1^{(0)} = H_2^{(0)} = H_3^{(0)} = 0,08$ м; степень точности поиска $\varepsilon = 10^{-3}$.

Результаты расчета по МСД позволили определить оптимальные значения проектных параметров для сечений станины вальцов: $H_1^* = 0,192$ м; $H_2^* = 0,158$ м; $H_3^* = 0,188$ м. Минимальный объем станины составил $V_{\min}^* = 5,2 \cdot 10^{-2}$ м³. Объем станины при расчете по допускаемым напряжениям $V_{[\sigma]} = 8,7 \cdot 10^{-2}$ м³.

Вывод. Масса оптимального варианта в 1,67 раза меньше массы существующего промышленного варианта, рассчитанного по допускаемым напряжениям.

4.3. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВАЛКА ЛАБОРАТОРНЫХ ВАЛЬЦОВ

Задача весовой оптимизации для валка вальцов (рис. 3.18) может быть сформулирована следующим образом: из заданных условий максимального распорного усилия между валками, допускаемых напряжений для материала валка и его прогиба найти такие значения внутренних диаметров d_{01} , d_{02} и d_{03} валка, чтобы объем (масса) конструкции был минимальным, т.е.:

$$V(d^*) = \min V(d), d \in D; \quad (4.11)$$

$$D = \{d: \sigma_{imax}(d) \leq [\sigma]_i; f_{imax}^i(d) \leq [f]_i; a_i \leq d_i \leq b_i; i = 1, 2, 3\}. \quad (4.12)$$

Здесь $V(d^*)$ – объем (масса) конструкции валка; a_i , b_i – наибольший и наименьший размеры внутренних диаметров валка; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение на изгиб при симметричном цикле для материала валка; $[f]_i$ – допускаемый прогиб валка, равный допускаемой величине разнотолщинности получаемого изделия; $\sigma^i(d_i)$ – эквивалентные напряжения для материала по принятой гипотезе прочности; D – допускаемая область проектных решений.

Исходные данные: $D = 0,16$ м; $d_2 = 0,095$ м; $d_3 = 0,080$ м; $D_1 = 0,15$ м; $D_2 = 0,5$ м; $D_3 = 0,13$ м; $l_1 = 0,32$ м; $l_2 = 0,11$ м; $l_3 = 0,115$ м; материал валка сталь 40X; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $[\sigma] = 150$ МПа [21]; максималь-

ное распорное усилие на валок $2P = 80 \text{ кН} = 8 \cdot 10^4 \text{ Н}$, что соответствует распределенному усилию по длине рабочей части валка $q_p = 250 \text{ кН}$ (рис. 4.4).

При этом в расчетах приняты следующие ограничения на размеры проектных параметров:

$$0,04 \leq d_{01} \leq 0,12 \text{ м}; \quad 0,04 \leq d_{02} \leq 0,07 \text{ м}; \quad 0,04 \leq d_{03} \leq 0,055 \text{ м}.$$

Система уравнений по ограничению прочности принималась в виде

$$\frac{\sigma_{1\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0; \quad \frac{\sigma_{2\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0; \quad \frac{\sigma_{3\max}}{[\sigma]} - 1 \leq 0.$$

Максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{1\max} = \sigma_3^E$, $\sigma_{2\max} = \sigma_3^C$, $\sigma_{3\max} = \sigma_3^A$ соответственно в бочке, цапфе и присоединительной части валка определялись по формулам (3.34), п. 3.4.9.

Функция минимального объема конструкции валка вальцов имеет вид:

$$V(d_{01}, d_{02}, d_{03}) = \pi/4((D^2 - d_{01}^2)l_1 + 2(d_2^2 - d_{02}^2)l_2 + 2(d_3^2 - d_{03}^2)l_3).$$

Для получения проекта минимального объема используется МСД при следующих данных: шаг вычислений $t = 0,001 \text{ м}$; начальная стартовая точка $d_{01}^{(0)} = 0,04 \text{ м}$; $d_{02}^{(0)} = 0,04 \text{ м}$; $d_{03}^{(0)} = 0,04 \text{ м}$; число, определяющее окончание процесса поиска оптимального решения $\varepsilon = 0,001$.

В результате решения поставленной задачи на ПЭВМ с использованием программы 8 (прил. Е) получены следующие значения оптимальных проектных параметров валка вальцов:

$$d_{01}^* = 0,120 \text{ м}; \quad d_{02}^* = 0,07 \text{ м}; \quad d_{03}^* = 0,05 \text{ м}.$$

Минимальный объем (масса) станины составил $V_{\min} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ($M = 32,2 \text{ кг}$), что примерно в 2 раза меньше объема конструкции существующего валка, полученного из расчета по допускаемым напряжениям, который составил $V_{[\sigma]} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ($M = 63,6 \text{ кг}$).

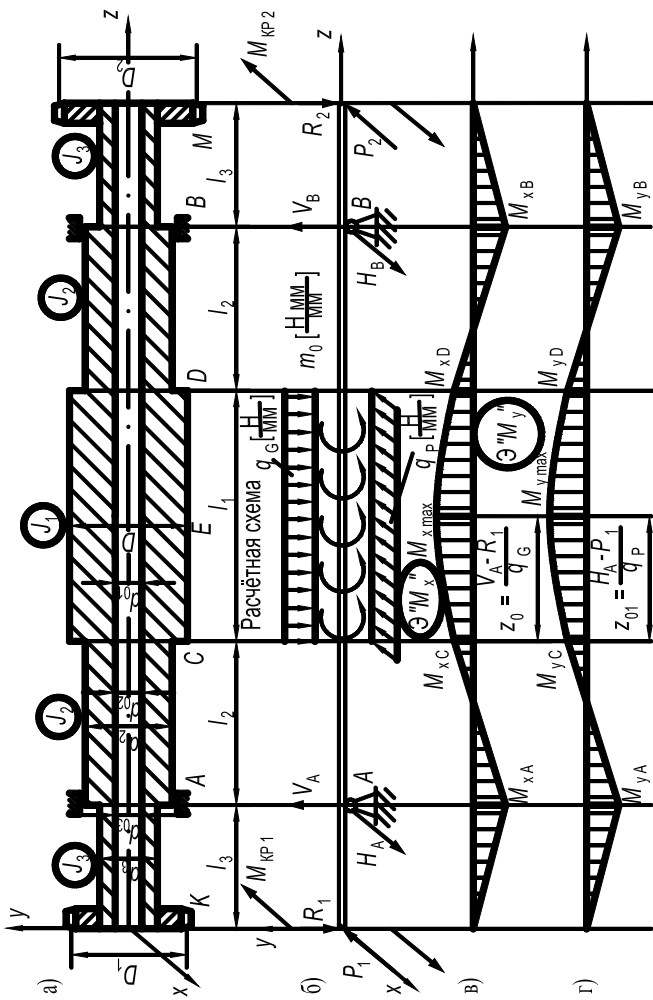


Рис. 4.4. Валок и его расчетные схемы

5. ВАЛКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И

ТЕХНОЛОГИЯ

ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

5.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В современном мире существует свыше 400 различных видов пластмассовых отходов. Мировое производство пластмасс возрастает в среднем на 5 – 6 % ежегодно и к 2010 г., по прогнозам, достигнет 250 млн. т. Их потребление на душу населения в индустриально развитых странах за последние 20 лет примерно удвоилось (достигнув 85 – 90 кг), а к концу десятилетия как полагают, повысится на 45 – 50 % [25].

Одним из быстроразвивающихся направлений использования пластмасс является упаковка. Уже с 1975 г. полимеры вышли на третье место после стекла, бумаги и картона по применению для упаковки [26].

Из всех выпускаемых пластиков 41 % используется в упаковке, из этого количества 47 % расходуется на упаковку пищевых продуктов [27, 28]. Удобство и безопасность, низкая цена и высокая эстетика являются определяющими условиями ускоренного роста использования пластических масс при изготовлении упаковки. Упаковка из синтетических полимеров, составляющая 40 % бытового мусора, практически "вечна" – она не подвергается разложению. Поэтому использование пластмассовой упаковки сопряжено с образованием отходов в размере 40 – 50 кг/год в расчете на одного человека.

В России предположительно к 2010 г. полимерные отходы составят больше 1 млн. т, а процент их использования до сих пор мал [29]. Учитывая специфические свойства полимерных материалов: они не подвергаются гниению, коррозии – проблема их утилизации носит, прежде всего, экологический характер. Общий объем захоронения твердых бытовых отходов только в Москве составляет около 4 млн. т в

год. От общего уровня отходов перерабатывается только 5 – 7 % от их массы. По данным на 1998 г. в усредненном составе твердых бытовых отходов, поставляемых на захоронение, 8 % составляет пластмасса, т.е. 320 тыс. т в год.

Однако в настоящее время проблема переработки отходов полимерных материалов обретает актуальное значение не только с позиций охраны окружающей среды, но и связана с тем, что в условиях дефицита полимерного сырья пластмассовые отходы становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом.

Вместе с тем решение вопросов, связанных с охраной окружающей среды, требует значительных капитальных вложений. Стоимость обработки и уничтожения отходов пластмасс примерно в 8 раз превышает расходы на обработку большинства промышленных и почти в 3 раза – на уничтожение бытовых отходов. Это связано со специфическими особенностями пластмасс, значительно затрудняющими или делающими непригодными известные методы уничтожения твердых отходов.

Использование отходов полимеров позволяет существенно экономить первичное сырье (прежде всего нефть) и электроэнергию [30].

Проблем, связанных с утилизацией полимерных отходов, достаточно много. Они имеют свою специфику, но их нельзя считать неразрешимыми. Однако решение невозможно без организации сбора, сортировки и первичной обработки амортизованных материалов и изделий; без разработки системы цен на вторичное сырье, стимулирующих предприятия к их переработке; без создания эффективных способов переработки вторичного полимерного сырья, а также методов его модификации с целью повышения качества; без создания специального оборудования для его переработки; без разработки номенклатуры изделий, выпускаемых из вторичного полимерного сырья.

Отходы пластических масс можно разделить на три группы.

1) Технологические отходы производства, которые возникают при синтезе и переработке термопластов. Они делятся на неустраняемые и устранимые технологические отходы. Неустраняемые – это крошки, выскочки, обрезки, литники, облой, грат и т.д. В отраслях промышленности, занимающихся производством и переработкой пластмасс, таких отходов образуется от 5 до 35 % [31]. Неустраняемые отходы, по существу, представляющие собой высококачественное сырье, по свойствам не отличаются от исходного первичного полимера. Переработка его в изделия не требует специального оборудования и производится на том же предприятии. Устранимые технологические отходы производства образуются при несоблюдении технологических режимов в процессе синтеза и переработки, т.е. это технологический брак, который может быть сведен до минимума или совсем устранен. Технологические отходы производства перерабатываются в различные изделия, используются в качестве добавки к исходному сырью и т.д.

2) Отходы производственного потребления – накапливаются в результате выхода из строя изделий из полимерных материалов, используемых в различных отраслях народного хозяйства (амортизованные шины, тара и упаковка, детали машин, отходы сельскохозяйственной пленки, мешки из-под удобрений и т.д.). Эти отходы являются наиболее однородными, малозагрязненными и поэтому представляют наибольший интерес с точки зрения их повторной переработки.

3) Отходы общественного потребления, которые накапливаются у нас дома, на предприятиях общественного питания и т.д., а затем попадают на городские свалки; в конечном итоге они переходят в новую категорию отходов – смешанные отходы.

Наибольшие трудности связаны с переработкой и использованием смешанных отходов. Причина этого в несовместимости термопластов, входящих в состав бытового мусора, что требует их поэтапного выделения. Кроме того, сбор изношенных изделий из полимеров у населения является чрезвычайно сложным мероприятием с организационной точки зрения и пока еще у нас в стране не налажен.

Основное количество отходов уничтожают захоронением в почву или сжиганием. Однако уничтожение отходов экономически невыгодно и технически сложно. Кроме того, захоронение, затопление и сжигание полимерных отходов ведет к загрязнению окружающей среды, к сокращению земельных угодий (организация свалок) и т.д.

Однако и захоронение, и сжигание продолжают оставаться довольно широко распространенными способами уничтожения отходов пластмасс. Чаще всего тепло, выделяющееся при сжигании, используют для получения пара и электроэнергии. Но калорийность сжигаемого сырья невелика, поэтому уста-

новки для сжигания, как правило, являются экономически малоэффективными. Кроме того, при сжигании происходит образование сажи от неполного сгорания полимерных продуктов, выделение токсичных газов и, следовательно, повторное загрязнение воздушного и водного бассейнов, быстрый износ печей за счет сильной коррозии [32].

В начале 70-х гг. прошлого века интенсивно начали развиваться работы по созданию био-, фото- и водоразрушаемых полимеров. Получение разлагаемых полимеров вызвало настоящую сенсацию, и этот способ уничтожения вышедших из строя пластмассовых изделий рассматривался как идеальный. Однако последующие работы в этом направлении показали, что трудно сочетать в изделиях высокие физико-механические характеристики, красивый внешний вид, способность к быстрому разрушению и низкую стоимость.

Создание фото- и биоразрушаемых пластмасс основано на введении в цепь полимера фото- и биоактивирующих добавок, которые должны содержать функциональные группы, способные разлагаться под действием ультрафиолетовых лучей или анаэробных бактерий. Трудность заключается в том, что добавки вводят в полимер на стадии синтеза или переработки, а разрушение его должно протекать после использования, но не во время переработки, поэтому проблема – в создании активаторов разрушения, обеспечивающих определенный срок службы пластмассовых изделий без ухудшения их качества. Активаторы должны быть также нетоксичными и не повышать стоимость материала.

Оценка сложившейся ситуации по разработке и освоению биodeградируемых пластмасс показана в работах [33 – 43].

В последние годы исследования в области саморазрушающихся полимеров значительно сократились в основном потому, что издержки производства при получении таких полимеров, как правило, значительно выше, чем при получении обычных пластических масс, и этот способ уничтожения является экономически невыгодным.

Основной путь использования отходов пластмасс – это их утилизация, т.е. повторное использование. Показано, что капитальные и эксплуатационные затраты по основным способам утилизации отходов не превышают, а в ряде случаев даже ниже затрат на их уничтожение. Положительной стороной утилизации является также и то, что получается дополнительное количество полезных продуктов для различных отраслей народного хозяйства и не происходит повторного загрязнения окружающей среды. По этим причинам утилизация является не только экономически целесообразным, но и экологически предпочтительным решением проблемы использования пластмассовых отходов. Подсчитано, что из ежегодно образующихся полимерных отходов в виде амортизированных изделий утилизации подвергается только незначительная часть (всего несколько процентов). Причиной этого являются трудности, связанные с предварительной подготовкой (сбор, сортировка, разделение, очистка и т.д.) отходов, отсутствием специального оборудования для переработки и т.д.

К основным способам утилизации отходов пластических масс относятся:

- термическое разложение путем пиролиза;
- разложение с получением исходных низкомолекулярных продуктов (мономеров, олигомеров);
- вторичная переработка.

Пиролиз – это термическое разложение органических продуктов в присутствии кислорода или без него. Пиролиз полимерных отходов позволяет получить высококалорийное топливо, сырье и полуфабрикаты, используемые в различных технологических процессах, а также мономеры, применяемые для синтеза полимеров.

В процессе пиролиза могут образовываться газообразные (пиролизный газ), жидкие (пиролизное масло) или твердые (кокс) продукты [44].

Газообразные продукты термического разложения пластмасс могут использоваться в качестве топлива для получения рабочего водяного пара. Жидкие продукты используются для получения теплоносителей. Спектр применения твердых (воскообразных) продуктов пиролиза отходов пластмасс достаточно широк (компоненты различного рода защитных составов, смазок, эмульсий, пропиточных материалов и др.) [45].

Совершенствование установок для сжигания бытового мусора привело к возникновению таких методов пиролиза, которые позволяют получать горючие, безвредные для окружающей среды газы, значи-

тельное уменьшение объема выбросов. Однако получаемые при этом пиролизные масла имеют очень сложный состав, содержат большое количество воды, термически нестабильны и по этим причинам не пригодны для использования в качестве химического сырья [46, 47].

Гидролиз является реакцией, обратной поликонденсации. С его помощью при направленном действии воды по местам соединения компонентов поликонденсаты разрушаются до исходных соединений. Гидролиз происходит под действием экстремальных температур и давлений. Глубина протекания реакции зависит от рН среды и используемых катализаторов.

Этот способ использования отходов энергетически более выгоден, чем пиролиз, так как в оборот возвращаются высококачественные химические продукты.

По сравнению с гидролизом для расщепления отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) более экономичен другой способ – гликолиз. Деструкция происходит при высоких температурах и давлении в присутствии этиленгликоля и с участием катализаторов до получения чистого дигликольтерефталата. По этому принципу можно также переэтерифицировать карбаматные группы в полиуретане.

Все же самым распространенным термическим методом переработки отходов ПЭТФ является их расщепление с помощью метанола – метанолиз. Процесс протекает при температуре выше 150 °С и давлении 1,5 МПа, ускоряется катализаторами переэтерификации. Этот метод очень экономичен. На практике применяют и комбинацию методов гликолиза и метанолиза [48].

В настоящее время наиболее приемлемым для России является вторичная переработка отходов полимерных материалов механическим рециклингом, так как этот способ переработки не требует дорогого специального оборудования и может быть реализован в любом месте накопления отходов. Устаревшие пластмассы можно также добавлять к углю или вводить в кокс для выплавки металла.

Далее рассмотрим основные методы вторичной переработки наиболее распространенных полимерных материалов.

5.2. УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПОЛИОЛЕФИНОВ

Полиолефины (ПО) – самый многотоннажный вид термопластов. Они находят широкое применение в различных отраслях промышленности, транспорта и в сельском хозяйстве. К полиолефинам относятся полиэтилен высокой и низкой плотности (ПЭВП и ПЭНП), полипропилен (ПП). Наиболее эффективным способом утилизации отходов ПО является их повторное использование. Ресурсы вторичных ПО велики: только отходы потребления ПЭНП в 1995 г. достигли 2 млн. т. Использование вторичных термопластов вообще и ПО в частности позволяет увеличить степень удовлетворения в них на 15 – 20 %.

Способы переработки отходов ПО зависят от марки полимеров и их происхождения. Наиболее просто перерабатываются технологические отходы, т.е. отходы производства, которые не подверглись интенсивному световому воздействию в процессе эксплуатации. Не требуют сложных методов подготовки и отходы потребления из ПЭВП и ПП, так как с одной стороны, изделия, изготавливаемые из этих полимеров, также не претерпевают значительных воздействий вследствие своей конструкции и назначения (толстостенные детали, тара, фурнитура и т.д.), а с другой стороны, исходные полимеры более устойчивы к воздействию атмосферных факторов, чем ПЭНП. Такие отходы перед повторным использованием нуждаются только в измельчении и гранулировании [49].

5.2.1. Структурно-химические особенности вторичного полиэтилена

Выбор технологических параметров переработки отходов ПО и областей использования получаемых из них изделий обусловлен их физико-химическими, механическими и технологическими свойствами, которые в значительной степени отличаются от тех же характеристик первичного полимера. К основным особенностям вторичного ПЭНП (ВПЭНП), которые определяют специфику его переработки, следует отнести: низкую насыпную плотность; особенности реологического поведения расплава, обусловленные высоким содержанием геля; повышенную химическую активность вследствие изменений структуры, происходящих при переработке первичного полимера и эксплуатации полученных из него изделий. Кроме того, вторичные полимеры характеризуются резким снижением разрушающего напря-

жения и особенно относительного удлинения, морозостойкости и теплостойкости при сравнительно низких напряжениях сдвига, а также текучести расплава вследствие образования гель-фракции [50 – 55].

В процессе переработки и эксплуатации материал подвергается механохимическим воздействиям, термической, тепло- и фотоокислительной деструкции, что приводит к появлению активных групп, которые при последующих переработках способны инициировать реакции окисления [56 – 58].

Изменение химической структуры начинается уже в процессе первичной переработки ПО, в частности при экструзии, когда полимер подвергается значительным термоокислительным и механохимическим воздействиям. Наибольший вклад в изменения, протекающие при эксплуатации, вносят фотохимические процессы. Эти изменения необратимы, в то время как физико-механические свойства, например, полиэтиленовой пленки, отслужившей один-два сезона для укрытия парников, после перепрессовки и экструзии почти полностью восстанавливаются [32].

Образование в ПЭ пленке при ее эксплуатации значительного числа карбонильных групп приводит к повышенной способности ВПЭНП поглощать кислород, следствием чего является образование во вторичном сырье винильных и винилиденовых групп, которые значительно снижают термоокислительную стабильность полимера при последующих переработках, инициируют процесс фотостарения таких материалов и изделий из них, снижают срок их службы. Концентрация карбонильных групп зависит от условий эксплуатации: так, во влажных субтропиках их накапливаемость в 30 раз больше, чем за то же время в условиях Москвы.

Наличие карбонильных групп не определяет ни механические свойства (введение их до 9 % в исходную макромолекулу не оказывает существенного влияния на механические свойства материала), ни пропускание пленкой солнечного света (поглощение света карбонильными группами лежит в области длин волн менее 280 нм, а свет такого состава практически не содержится в солнечном спектре) [58]. Однако именно наличие карбонильных групп в ПЭ обуславливает весьма важное его свойство – стойкость к воздействию света.

Инициаторами фотостарения полиэтилена (ПЭ) являются гидропероксиды, образующиеся еще при переработке первичного материала в процессе механохимической деструкции [56, 57, 59]. Их инициирующее действие особенно эффективно на ранних стадиях старения, в то время как карбонильные группы оказывают существенное влияние на более поздних стадиях. Установлено, что предшествующее вторичной переработке ультрафиолетовое облучение усиливает чувствительность ПЭ пленки к последующему фотоокислению гораздо сильнее, чем одна повторная переработка [60].

При старении вторичного ПЭ (ВПЭ) существенным становится не только распад карбонильных соединений на свободные радикалы, но и распад, приводящий к разрыву цепи.

Используемый для вторичной переработки ВПЭНП, получаемый из отходов сельскохозяйственной пленки, характеризуется не только наличием окисленных участков, содержащих гидропероксидные и карбонильные группы, но и наличием нерастворимой гель-фракции. Содержание ее не является постоянным и меняется от партии к партии (от 0,5 до 46 % и более), что зависит от условий старения изделий [50].

Как известно, при старении протекают конкурирующие реакции деструкции и структурирования. Следствием первой является образование низкомолекулярных продуктов, второй – нерастворимой гель-фракции. Скорость образования низкомолекулярных продуктов максимальна в начале старения. Этот период характеризуется низким содержанием геля и снижением физико-механических показателей.

В дальнейшем скорость образования низкомолекулярных продуктов снижается, наблюдается резкое возрастание содержания геля и уменьшение относительного удлинения, что свидетельствует о протекании процесса структурирования. Затем (после достижения максимума) содержание геля в ВПЭ при его фотостарении снижается, что совпадает с полным израсходованием винилиденовых групп в полимере и достижением предельно допустимых значений относительного удлинения. Такой эффект объясняется вовлечением образовавшихся пространственных структур в процессе деструкции, а также растрескиванием по границе морфологических образований, что приводит к снижению физико-механических характеристик и ухудшению оптических свойств.

Скорость изменения физико-механических характеристик ВПЭ практически не зависит от содержания в нем гель-фракции. Однако содержание геля необходимо всегда учитывать как структурный фак-

тор при выборе способа повторной переработки, модификации и при определении областей использования полимера.

В табл. 5.1 приведены характеристики свойств ПЭНП до и после старения в течение 3 месяцев и ВПЭНП, полученного экструзией из состаренной пленки.

5.1. Характеристики свойств ПЭНП и ВПЭНП

Характеристики	ПЭНП		ВПЭНП
	Исходный	После эксплуатации	Экструзионный
Содержание групп С-О, моли	0,1	1,6	1,6
Содержание низкомолекулярных продуктов, %	0,1	6,2	6,2
Содержание геля, %	0	20	20
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	15	11,4	10
Относительное удлинение при разрыве, %	780,5	27	505
Стойкость к растрескиванию, ч	8	–	1
Светостойкость, сут.	90	–	50

Характер изменения физико-механических характеристик для ПЭНП и ВПЭНП неодинаков: у первичного полимера наблюдается монотонное снижение и прочности и относительного удлинения, которые составляют 30 и 70 % соответственно после старения в течение 5 месяцев. Для вторичного ПЭНП характер изменения этих показателей несколько отличается: разрушающее напряжение практически не изменяется, а относительное удлинение уменьшается на 90 %. Причиной этого может быть наличие гелевой фракции во ВПЭНП, которая выполняет функцию активного наполнителя полимерной матрицы. Наличие такого "наполнителя" – причина появления значительных напряжений, следствием чего является повышение хрупкости материала, резкое снижение относительного удлинения (вплоть до 10 % от значений для первичного ПЭ), стойкости к растрескиванию, прочности при растяжении (10 – 15 МПа), эластичности, повышение жесткости.

В ПЭ при старении происходит не только накопление кислородосодержащих групп, в том числе кетонных и низкомолекулярных продуктов, но и значительное снижение физико-механических характеристик, которые не восстанавливаются после вторичной переработки состаренной полиолефиновой пленки. Структурно-химические превращения в ВПЭНП происходят в основном в аморфной фазе. Это приводит к ослаблению межфазной границы в полимере, в результате чего материал теряет прочность, становится хрупким, ломким и подверженным дальнейшему старению как при повторной переработке в изделия, так и при эксплуатации таких изделий, которые характеризуются низкими физико-механическими показателями и сроком службы.

Для оценки оптимальных режимов переработки вторичного полиэтиленового сырья большое значение имеют его реологические характеристики [51]. Для ВПЭНП характерна низкая текучесть при малых напряжениях сдвига, которая повышается при увеличении напряжения, причем рост текучести для ВПЭ больше, чем для первичного. Причиной этого является наличие геля во ВПЭНП, который значительно повышает энергию активации вязкого течения полимера. Текучесть можно регулировать, также изменяя температуру при переработке – с увеличением температуры текучесть расплава увеличивается.

Ввиду того, что физико-механические показатели ВПЭ ниже, чем у первичного, уровень равновесных напряжений во вторичном полимере должен быть также ниже. Поэтому изготовленные из него изделия необходимо эксплуатировать при более низких нагрузках, чем такие же изделия из первичного

полимера, и в течение более короткого времени. Это необходимо учитывать при разработке номенклатуры изделий, изготавливаемых из вторичных термопластов, а также при расчете их несущей способности [62].

Итак, на вторичную переработку поступает материал, предыстория которого оказывает весьма существенное влияние на его физико-механические и технологические свойства. В процессе вторичной переработки полимер подвергается дополнительным механохимическим и термоокислительным воздействиям, причем изменение его свойств зависит от кратности переработки. При многократных переработках во время периодического контакта полимера с кислородом воздуха вследствие образования большего количества гидропероксидов увеличивается число разрывов цепей, и степень сшивания уменьшается. В отличие от непрерывной переработки, которая протекает при недостатке кислорода и приводит к сшиванию полимера, многократная переработка вторичного сырья приводит к автокаталитическому росту содержания гидропероксидов, которые оказывают катастрофическое воздействие на фотостабильность полимера и соответственно на срок службы получаемых из него изделий [60].

При исследовании влияния кратности переработки на свойства получаемых изделий показано, что 3 – 5 кратная переработка оказывает незначительное влияние (гораздо меньше, чем первичная). Заметное снижение прочности начинается при 5 – 10-кратной переработке. В процессе повторных переработок ВПЭНП рекомендуется повышать температуру литья на 3 – 5 % или число оборотов шнека при экструзии на 4 – 6 % [63] для разрушения образующегося геля. Необходимо отметить, что в процессе повторных переработок, особенно при воздействии кислорода воздуха, происходит снижение молекулярной массы полиолефинов, которое приводит к резкому повышению хрупкости материала. Многократная переработка другого полимера из класса полиолефинов – ПП приводит обычно к увеличению показателя текучести расплава (ПТР), хотя при этом прочностные характеристики материала не претерпевают значительных изменений. Поэтому отходы, образующиеся при изготовлении деталей из ПП, а также сами детали по окончании срока эксплуатации могут быть повторно использованы в смеси с исходным материалом для получения новых деталей [49].

Из всего сказанного выше следует, что вторичное ПО сырье следует подвергать модификации с целью улучшения качества и повышения срока службы изделий из него.

5.2.2. Технология переработки вторичного полиолефинового сырья в гранулят

Для превращения отходов термопластов в сырье, пригодное для последующей переработки в изделия, необходима его предварительная обработка. Выбор способа предварительной обработки зависит в основном от источника образования отходов и степени их загрязненности. Так, однородные отходы производства и переработки ПЭНП обычно перерабатывают на месте их образования, для чего требуется незначительная предварительная обработка – главным образом измельчение и грануляция.

Отходы в виде вышедших из употребления изделий требуют более основательной подготовки. Предварительная обработка отходов сельскохозяйственной ПЭ пленки, мешков из-под удобрений, отходов из других компактных источников, а также смешанных отходов включает следующие этапы: сортировка (грубая) и идентификация (для смешанных отходов), измельчение, разделение смешанных отходов, мойка, сушка. После этого материал подвергают грануляции.

Предварительная сортировка предусматривает грубое разделение отходов по различным признакам: цвету, габаритам, форме и, если это нужно и возможно, по видам пластмасс. Предварительную сортировку производят, как правило, вручную на столах или ленточных конвейерах; при сортировке одновременно удаляют из отходов различные посторонние предметы и включения.

Разделение смешанных (бытовых) отходов термопластов по видам проводят следующими основными способами: флотационным, разделением в тяжелых средах, аэросепарацией, электросепарацией, химическими методами и методами глубокого охлаждения [64]. Наибольшее распространение получил метод флотации, который позволяет разделять смеси таких промышленных термопластов, как ПЭ, ПП, полистирол (ПС) и поливинилхлорид (ПВХ). Разделение пластмасс производится при добавлении в воду поверхностно-активных веществ, которые избирательно изменяют их гидрофильные свойства.

В некоторых случаях эффективным способом разделения полимеров может оказаться растворение их в общем растворителе или в смеси растворителей. Обработывая раствор паром, выделяют ПВХ, ПС и смесь полиолефинов; чистота продуктов – не менее 96 %.

Методы флотации и разделения в тяжелых средах являются наиболее эффективными и экономически целесообразными из всех перечисленных выше. Однако экономически более выгодно использовать

смешанные отходы без разделения. Но термодинамическая несовместимость полимеров приводит к тому, что их смеси обладают более низкими показателями физико-механических свойств по сравнению с индивидуальными полимерами или их отходами. Поэтому оптимальным решением при совместном использовании таких отходов является удаление ПВХ из смеси и его самостоятельная переработка. В смесь рекомендуется вводить различные вещества, повышающие совместимость ингредиентов в смешанных отходах [65].

Вторичная переработка ПО в гранулы в настоящее время в основном производится по схеме, показанной на рис. 5.1.

Вышедшие из употребления ПО отходы с содержанием посторонних примесей не более 5 % со склада сырья поступают на узел сортировки отходов 1, в процессе которой из них удаляют случайные инородные включения и выбраковывают сильно загрязненные куски. Отходы, прошедшие сортировку, измельчают в ножевых дробилках 2 мокрого или сухого измельчения до получения рыхлой массы с размером частиц 2 – 9 мм [66].

Производительность измельчительного устройства определяется не только его конструкцией, числом и длиной ножей, частотой вращения ротора, но и видом отходов. Так, самая низкая производительность при переработке отходов пенопластов, которые занимают очень большой объем и которые трудно компактно загрузить. Более высокая производительность достигается при переработке отходов пленок, волокон, выдувных изделий.

Для всех ножевых дробилок характерной особенностью является повышенный шум, который связан со спецификой процесса измельчения вторичных полимерных материалов. Для снижения уровня шума

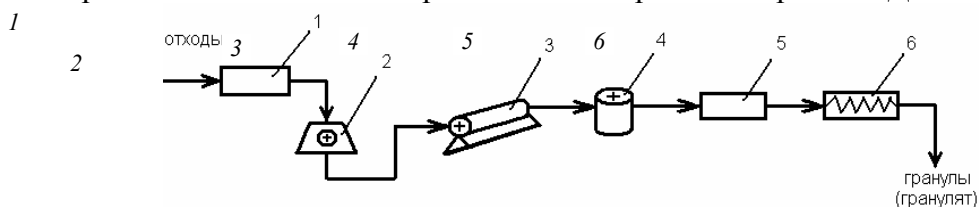


Рис. 5.1. Схема вторичной переработки полиолефинов в гранулы:

1 – узел сортировки отходов; 2 – дробилка; 3 – моечная машина;

4 – центрифуга; 5 – сушильная установка; 6 – гранулятор

измельчитель вместе с двигателем и вентилятором заключают в шумозащитный кожух, который может выполняться разъемным и иметь специальные окна с заслонками для загрузки измельчаемого материала.

Измельчение – очень важный этап подготовки отходов к переработке, так как степень измельчения определяет объемную плотность, сыпучесть и размеры частиц получаемого продукта. Регулирование степени измельчения позволяет механизировать процесс переработки, повысить качество материала за счет усреднения его технологических характеристик, сократить продолжительность других технологических операций, упростить конструкцию перерабатывающего оборудования.

Весьма перспективным способом измельчения является криогенный, который позволяет получать порошки из отходов со степенью дисперсности от 0,5 до 2 мм [67]. Использование порошковой технологии [68, 69] имеет ряд преимуществ: снижение продолжительности смешения; сокращение расхода энергии и затрат рабочего времени на текущее обслуживание смесителей; лучшее распределение компонентов в смеси; уменьшение деструкции макромолекул и др.

Из известных методов получения порошкообразных полимерных материалов, используемых в химической технологии, для измельчения отходов термопластов наиболее приемлемым является способ механического измельчения. Механическое измельчение можно осуществлять двумя путями: криогенным способом (измельчение в среде жидкого азота или другого хладагента [67] и при обычных температурах в среде дезагломерирующих ингредиентов, которые являются менее энергоемкими.

Далее измельченные отходы подают на отмывку в моечную машину 3. Отмывку ведут в несколько приемов специальными моющими смесями. Отжатую в центрифуге 4 массу с влажностью 10 – 15 % подают на окончательное обезвоживание в сушильную установку 5, достигая остаточного содержания влаги 0,2 % [66].

Для сушки отходов применяют сушилки различных типов: полочные, ленточные, ковшевые, с "кипящим" слоем, вихревые и т. д.

За рубежом выпускают установки, в которых есть устройства и для мойки, и для сушки производительностью до 350 – 500 кг/ч. В такой установке измельченные отходы загружают в ванну, которую за-

полняют моющим раствором. Пленка перемешивается лопастной мешалкой, при этом грязь оседает на дно, а отмытая пленка всплывает. Обезвоживание и сушку пленки осуществляют на вибросите и в вихревом сепараторе. Остаточная влажность составляет менее 0,1 %.

Грануляция является заключительной стадией подготовки вторичного сырья для последующей переработки в изделия. Эта стадия особенно важна для ВПЭНП в связи с его низкой насыпной плотностью и трудностью транспортирования. В процессе гранулирования происходит уплотнение материала, облегчается его дальнейшая переработка, усредняются характеристики вторичного сырья, в результате чего получают материал, который можно перерабатывать на стандартном оборудовании.

Для пластикации измельченных и очищенных отходов ПО наиболее широкое применение нашли одночервячные экструдеры b длиной шнека $(25 - 30)D$, оснащенные фильтром непрерывного действия и имеющие зону дегазации. На таких экструдерах довольно эффективно перерабатываются практически все виды вторичных термопластов при насыпной плотности измельченного материала от 50 до 300 кг/м³. Однако для переработки загрязненных и смешанных отходов необходимы червячные прессы специальных конструкций с короткими многозаходными червяками (длиной 3,5 – 5 D), имеющими цилиндрическую насадку в зоне выдавливания [70].

Для переработки отходов термопластов многие зарубежные фирмы выпускают специализированное оборудование [70], например, японское оборудование системы Reverser.

Основным блоком этой системы является экструдер с мощностью привода 90 кВт, диаметром шнека 253 мм и отношением $L / D = 3,75$. На выходе экструдера сконструирована гофрированная насадка диаметром 420 мм. Благодаря выделению тепла при трении и сдвиговым воздействиям на полимерный материал, он плавится за короткий промежуток времени, причем обеспечивается быстрая гомогенизация расплава. Изменяя зазор между конусной насадкой и кожухом, можно регулировать усилие сдвига и силу трения, изменяя при этом режим переработки. Поскольку плавление происходит очень быстро, термодеструкции полимера не наблюдается. Система снабжена узлом дегазации, что является необходимым условием при переработке вторичного полимерного сырья.

Вторичные гранулированные материалы получают в зависимости от последовательности процессов резки и охлаждения двумя способами: грануляцией на головке и подводным гранулированием. Выбор способа гранулирования зависит от свойств перерабатываемого термопласта и, особенно, от вязкости его расплава и адгезии к металлу.

При грануляции на головке расплав полимера выдавливается через отверстие в виде цилиндрических жгутов, которые отрезаются скользящими по фильерной плите ножами. Полученные гранулы ножом отбрасываются от головки и охлаждаются. Резание и охлаждение можно производить в воздушной среде, в воде либо резанием в воздушной среде, а охлаждение – в воде. Для ПО, которые имеют высокую адгезию к металлу и повышенную склонность к слипанию, в качестве охлаждающей среды применяют воду.

При использовании оборудования с большой единичной мощностью применяют так называемое подводное гранулирование. При этом способе расплав полимера выдавливается в виде стренгов через отверстия фильерной плиты на головке сразу в воду и разрезается на гранулы вращающимися ножами. Температура охлаждающей воды поддерживается в пределах 50 – 70 °С, что способствует более интенсивному испарению остатков влаги с поверхности гранул; количество воды составляет 20 – 40 м³ на 1 т гранулята.

Чаще всего в головке грануляторов формируются стренги или ленты, которые гранулируются после охлаждения в водяной ванне. Диаметр получаемых гранул составляет 2 – 5 мм.

Охлаждение должно проводиться при оптимальном режиме, чтобы гранулы не деформировались, не слипались и чтобы обеспечивалось удаление остатков влаги.

Существенное влияние на распределение гранул по размерам оказывает температура головки. Для обеспечения равномерной температуры расплава между экструдером и выходными отверстиями головки располагают решетки. Число выходных отверстий в головке – от 20 до 300.

Производительность процесса гранулирования зависит от вида вторичного термопласта и его реологических характеристик [32].

Исследования гранулята ВПЭ свидетельствуют о том, что его вязкотекучие свойства практически не отличаются от свойств первичного ПЭ, т.е. его можно перерабатывать при тех же режимах экструзии и литья под давлением, что первичный ПЭ. Однако получаемые изделия характеризуются низкими качеством и долговечностью.

Из гранулята получают упаковки для товаров бытовой химии, вешалки, детали строительного назначения, сельскохозяйственные орудия, поддоны для транспортировки грузов, вытяжные трубы, облицовку дренажных каналов, безнапорные трубы для мелиорации и другие изделия. Эти изделия получают из "чистого" вторичного сырья. Однако более перспективным является добавление вторичного сырья к первичному в количестве 20 – 30 %. Введение в полимерную композицию пластификаторов, стабилизаторов, наполнителей позволяет увеличить эту цифру до 40 – 50 %. Это повышает физико-механические характеристики изделий, однако их долговечность (при эксплуатации в жестких климатических условиях) составляет всего 0,6 – 0,75 от долговечности изделий из первичного полимера. Более эффективный путь – модификация вторичных полимеров, а также создание высоконаполненных вторичных полимерных материалов.

5.2.3. Способы модификации вторичных полиолефинов

Результаты исследования механизма процессов, протекающих при эксплуатации и переработке ПО, и их количественное описание позволяют сделать вывод о том, что получаемые из вторичного сырья полупродукты должны содержать не более 0,1 – 0,5 моля окисленных активных групп, иметь оптимальные молекулярную массу и ММР (макро-молекулярный разброс), обладать воспроизводимыми физико-механическими и технологическими показателями. Только в этом случае полупродукт можно использовать для производства изделий с гарантированным сроком службы взамен дефицитного первичного ПО сырья. Однако получаемый в настоящее время гранулят этим требованиям не удовлетворяет.

Надежным путем решения проблемы создания качественных полимерных материалов и изделий из вторичных ПО является модификация гранулята, цель которой – экранирование функциональных групп и активных центров химическими или физико-химическими способами и создание однородного по структуре материала с воспроизводимыми свойствами.

Методы модификации вторичного ПО сырья можно разделить на химические (сшивание, введение различных добавок, главным образом органического происхождения, обработка кремнийорганическими жидкостями и др.) и физико-механические (наполнение минеральными и органическими наполнителями).

Например, максимальное содержание гель-фракции (до 80 %) и наиболее высокие физико-механические показатели сшитого ВПЭНП достигаются при введении 2 – 2,5 % пероксида дикумила на вальцах при 130 °С в течение 10 мин. Относительное удлинение при разрыве такого материала – 210 %, показатель текучести расплава составляет 0,1 – 0,3 г / 10 мин. Степень сшивания уменьшается с повышением температуры и увеличением продолжительности вальцевания в результате протекания конкурирующего процесса деструкции. Это позволяет регулировать степень сшивания, физико-механические и технологические характеристики модифицированного материала.

Разработан метод формования изделий из ВПЭНП путем введения пероксида дикумила непосредственно в процессе переработки и получены опытные образцы труб и литевых изделий, содержащих 70 – 80 % гель-фракции.

Введение воска и эластопласта (до 5 мас. ч.) значительно улучшает перерабатываемость ВПЭ, повышает показатели физико-механических свойств (особенно относительное удлинение при разрыве и стойкость к растрескиванию – на 10 % и с 1 до 320 ч соответственно) и уменьшает их разброс, что свидетельствует о повышении однородности материала.

Модификация ВПЭНП малеиновым ангидридом в дисковом экструдере также приводит к повышению его прочности, теплостойкости, адгезионной способности и стойкости к фотостарению. При этом модифицирующий эффект достигается при меньшей концентрации модификатора и меньшей продолжительности процесса, чем при введении эластопласта.

Полученные данные легли в основу разработки технологии получения компонента герметиков на основе бутилкаучука для наклеивания линолеума, керамической плитки, а также клеев-расплавов с относительно невысокой температурой плавления для склеивания кожевенных, текстильных и других материалов.

Перспективным способом повышения качества полимерных материалов из вторичных ПО является термомеханическая обработка кремнийорганическими соединениями [71]. Этот способ позволяет получать изделия из вторичного сырья с повышенными прочностью, эластичностью и стойкостью к старению. Механизм модификации заключается в образовании химических связей между силоксановыми группами кремнийорганической жидкости и непредельными связями и кислородосодержащими группами вторичных ПО.

Технологический процесс получения модифицированного материала включает следующие стадии: сортировка, дробление и отмывка отходов; обработка отходов кремнийорганической жидкостью при 90 ± 10 °С в течение 4 – 6 ч; сушка модифицированных отходов методом центрифугирования; перегрануляция модифицированных отходов.

Расчет экономической эффективности при выпуске дренажных труб из полученного таким способом полимера взамен керамических показал целесообразность этого метода модификации ВПЭНП. Кроме труб из модифицированного полимера, могут быть получены также различные емкости, тара, детали вентиляторов, упаковочные и защитные пленки и другие изделия.

Помимо твердофазного способа модификации предложен способ модификации ВПЭ в растворе, который позволяет получать порошок ВПЭНП с размером частиц не более 20 мкм. Этот порошок может быть использован для переработки в изделия методом ротационного формования и для нанесения покрытий методом электростатического напыления.

Вторичный ПЭ, полученный из отходов сельскохозяйственной пленки, сам может служить модифицирующей добавкой при создании полимерных материалов типа попролин. Это материалы на основе ПП (попролин-1), а также ПП и ВПЭНП (попролин-2).

Предпосылкой для разработки композиций на основе ПП с использованием ВПЭНП послужили результаты работ по созданию попролина-1, который представляет собой модифицированный щелочным сульфатным лигнином – отходом целлюлозно-бумажной промышленности – полимерный материал на основе ПП. Для повышения морозостойкости в него вводили низкомолекулярный пластификатор – диоктилсебацат (ДОС). Прочностные характеристики такого полимера сохраняются на уровне прочности ПП, а в некоторых случаях даже превышают ее. Морозостойкость и стойкость к старению попролина-1 в несколько раз выше, чем ПП. Изучение реологических свойств попролина-1 показало, что его можно перерабатывать при более "мягких" режимах и с меньшими энергетическими затратами, чем ПП.

В попролине-2 вместо низкомолекулярного легко выпотевающего пластификатора ДОС содержится ВПЭНП, который играет роль высокомолекулярной пластифицирующей добавки, хорошо совмещающейся с основным полимером [72]. Полученные результаты позволили рекомендовать для переработки попролина-2 в изделия технологические режимы, аналогичные тем, которые используется при переработке попролина-1. Попролин-2 предназначается для производства тары (ящиков) для мясных и молочных продуктов.

Разработка подобных композиций продиктована потребностями различных отраслей промышленности, главным образом производящих продукты питания, которые широко используют полимерные материалы для производства тары.

Большой научный и практический интерес представляет создание наполненных полимерных материалов на основе вторичного полиэтиленового сырья. Использование полимерных материалов из вторичного сырья, содержащих до 30 % наполнителя, позволит высвободить до 40 % первичного сырья и направить его на производство изделий, которые нельзя получить из вторичного (напорные трубы, упаковочные пленки, транспортная многооборотная тара и др.). Это в значительной степени сократит дефицит первичного полимерного сырья.

Для получения наполненных полимерных материалов из вторичного сырья можно использовать дисперсные и армирующие наполнители минерального и органического происхождения, а также наполнители, которые можно получать из полимерных отходов (измельченные отходы реактопластов и резиновая крошка). Наполнению можно подвергать практически все отходы термопластов, а также смешанные отходы, которые для этой цели использовать предпочтительней и с экономической точки зрения.

Например, целесообразность применения лигнина связана с наличием в нем фенольных соединений, способствующих стабилизации ВПЭНП при эксплуатации; слюды – с получением изделий, обладающих низкой ползучестью, повышенной тепло- и атмосферостойкостью, а также характеризующихся небольшим износом перерабатывающего оборудования и низкой стоимостью. Каолин, ракушечник, сланцевая зола, угольные сферы и железо применяются как дешевые инертные наполнители.

При введении в ВПЭ мелкодисперсного фосфогипса, гранулированного в полиэтиленовом воске, получены композиции, имеющие повышенное удлинение при разрыве. Этот эффект можно объяснить пластифицирующим действием полиэтиленового воска. Так прочность при разрыве ВПЭ, наполненного фосфогипсом, на 25 % выше, чем у ВПЭ, а модуль упругости при растяжении больше на 250 %.

Усиливающий эффект при введении во ВПЭ слюды связан с особенностями кристаллического строения наполнителя, высоким характеристическим отношением (отношением диаметра чешуйки к толщине), причем применение измельченного, порошкообразного ВПЭ позволило сохранить строение чешуек при минимальном разрушении.

У композиций с отходами эластомерного сырья относительное удлинение при разрыве выше в 2 – 2,5 раза по сравнению с этим показателем для ВПЭ. Это обеспечивает возможность их использования для изготовления изделий, подвергающихся значительным изгибающим или растягивающим напряжением [73].

Композиции, содержащие лигнин, сланцы, каолин, сферы, отходы сапропеля, обладают сравнительно невысокими физико-механическими показателями, зато они являются наиболее дешевыми и могут найти применение при производстве гидроизоляционных настилов, плит, торцевого паркета [74] и других изделий строительного назначения.

5.3. УТИЛИЗАЦИЯ И ВТОРИЧНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА, ПОЛИСТИРОЛЬНЫХ ПЛАСТИКОВ, ПОЛИАМИДОВ, ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Поливинилхлорид (ПВХ) – один из наименее стабильных карбоцепных промышленных полимеров. Реакция деструкции ПВХ – дегидрохлорирование начинается уже при температурах выше 100 °С, а при 160 °С реакция протекает очень быстро. В результате термоокисления ПВХ происходят агрегативные и дезагрегативные процессы – сшивание и деструкция.

Важной характеристикой, определяющей принципиальную возможность вторичной переработки ПВХ-отходов (допустимое время переработки, срок службы вторичного материала или изделия), а также необходимость дополнительного усиления стабилизирующей группы, является время термостабильности [75].

Основными видами отходов на основе ненаполненных ПВХ являются нежелатинизированный пластизол, технологические отходы и бракованные изделия. На предприятиях легкой промышленности России действует следующая технология переработки отходов пластизоля методами литья под давлением. Процесс включает измельчение отходов пленок и листов, приготовление пасты ПВХ в пластикаторе, формование нового изделия методом литья.

Нежелатинизированный пластизол при очистке дозатора, смесителя собирали в емкости, подвергали желатинизации, далее смешивали с технологическими отходами и бракованными изделиями на вальцах, полученные листы подвергали переработке на измельчителях роторного типа. Полученную таким образом пластизольную крошку перерабатывали методом литья под давлением. Пластизольная крошка в количестве от 10 до 50 мас. ч. может быть использована в композиции с каучуком для получения резиновых смесей, причем это позволяет исключить из рецептур мягчители.

Введение пластизольной крошки до 50 мас. ч. практически не сказывается на прочности композиций и сопротивлении истиранию, приводя к повышенной твердости [76].

Для переработки отходов, наполненных ПВХ-пластиком, в общем случае предлагается следующая схема.

Предварительно рассортированные отходы ИК (искусственные кожи) измельчают на ножевых дробилках, вводят в них необходимые добавки и в процессе регрануляции гомогенизируют и уплотняют смесь. Регрануляты перерабатывают на литьевых машинах, получая защитные покрытия для педалей, грязезащитные полотна для грузовых автомобилей и т.д. Изделия обладают гладкой поверхностью, которая может быть окрашена, а также достаточной стойкостью к истиранию и образованию трещин [77].

Для переработки отходов методом литья под давлением, как правило, применяют машины, работающие по типу интрузии, с постоянно вращающимся шнеком, конструкция которого обеспечивает самопроизвольный захват и гомогенизацию отходов.

В настоящее время одним из наиболее эффективных способов переработки отходов полимерных материалов на основе ПВХ с целью их утилизации является метод упруго-деформационного диспергирования, основанный на явлении множественного разрушения в условиях комбинированного воздействия на материал высокого давления и сдвиговой деформации при повышенной температуре. Сущность

метода заключается в том, что энергия, запасенная в материале при приложении давления, под воздействием сдвиговой деформации способствует образованию новой поверхности [78, 79].

Для переработки полимерных комбинированных материалов, в том числе ИК, отходов кабельной изоляции, термопластичных покрытий на бумажной основе и других, могут быть использованы способы, основанные на комбинации экструзионной подготовки и формования методом прессования. Для реализации этого метода предлагается агрегат, состоящий из двух машин, впрыск каждой из которых 10 кг. Доля присутствующих в отходах, специально введенных в них неполимерных материалов, может составлять до 25 %, причем даже содержание меди может достигать 10 %.

Также применяется метод совместной экструзии свежего термопласта, образующего пристенные слои, и полимерных отходов, составляющих внутренний слой, в результате может быть получено трехслойное изделие (например, пленка). Другой метод – раздувное формование предложен в [80]. В разработанной конструкции экструзионно-раздувной установки в качестве генератора расплава предусмотрен червячно-дисковый экструдер с раздувным приводом. Экструзией с раздувом из смеси первичного и вторичного ПВХ изготавливают бутылки, емкости и другие полые изделия.

Проблема регенерации отходов ПВХ-пластиков в настоящее время интенсивно разрабатывается, однако имеется немало трудностей, связанных прежде всего с наличием наполнителя. Некоторые разработчики пошли по пути выделения полимера из композита с последующим его использованием. Однако зачастую эти технологические варианты неэкономичны, трудоемки и пригодны для узкого ассортимента материалов.

Известные способы прямого термоформования либо требуют высоких дополнительных затрат (подготовительные операции, добавка первичного полимера, пластификаторов, использование специального оборудования), либо не позволяют перерабатывать высоконаполненные отходы, в частности, ПВХ-пластики.

Отходы полистирола накапливаются в виде вышедших из употребления изделий из ПС и его сополимеров (хлебницы, вазы, сырницы, различная посуда, решетки, банки, вешалки, облицовочные листы, детали торгового и лабораторного оборудования и т.д.), а также в виде промышленных (технологических) отходов ПС общего назначения, ударопрочного ПС (УПС) и его сополимеров.

Вторичное использование полистирольных пластиков может идти по следующим путям:

- утилизация сильно загрязненных промышленных отходов;
- утилизация технологических отходов УПС и АБС-пластика методами литья под давлением, экструзии и прессования;
- утилизация изношенных изделий;
- утилизация отходов пенополистирола (ППС);
- утилизация смешанных отходов.

Сильно загрязненные промышленные отходы образуются в производстве ПС и полистирольных пластиков при чистке реакторов, экструдеров и технологических линий в виде кусков различной величины и формы [81]. Эти отходы вследствие загрязненности, неоднородности и низкого качества в основном уничтожают путем сжигания. Возможна их утилизация деструкцией, с использованием получаемых жидких продуктов в качестве топлива.

Технологические отходы ПС (так же, как и ПО) по своим физико-механическим и технологическим свойствам не отличаются от первичного сырья. Эти отходы являются возвратными и в основном используются на тех предприятиях, где они образуются. Их можно добавлять к первичному ПС или использовать в качестве самостоятельного сырья при производстве различных изделий [82].

Значительно более сложная ситуация наблюдается в области утилизации изношенных изделий из ПС, в том числе вспененных пластиков. За рубежом основными путями их утилизации являются пиролиз, сжигание, фото- или биоразложение, захоронение. Амортизированные изделия культурно-бытового назначения, а также промышленности полимерных, строительных, теплоизоляционных материалов и др. можно подвергать повторной переработке в изделия. В основном это касается изделий из ударопрочного ПС.

Для превращения отходов полистирольных пленок во вторичное полимерное сырье их подвергают агломерированию в роторных агломераторах. Низкое значение ударной вязкости ПС обуславливает быстрое измельчение (по сравнению с другими термопластами). Однако высокая адгезионная способность ПС приводит, во-первых, к слипанию частиц материала и образованию крупных агломератов до того (80 °С), как материал становится пластичным (130 °С), и, во-вторых, к прилипанию материала к перера-

батывающему оборудованию. Это значительно затрудняет агломерирование ПС по сравнению с ПЭ, ПП и ПВХ.

Отходы ППС можно растворять в стироле, а затем полимеризовать в смеси, содержащей измельченный каучук и другие добавки. Полученные таким способом сополимеры характеризуются достаточно высокой ударной прочностью.

В настоящее время перед перерабатывающей промышленностью стоит проблема переработки смешанных отходов пластмасс. В смешанных бытовых отходах термопластов содержится от 5 до 15 % изношенных изделий из ПС, который можно выделять флотацией. Имеется опыт переработки смешанных бытовых отходов пластмасс, содержащих 60 % ПЭ, 15 – 20 % ПС и 15 % ПВХ [61]. Технология переработки смешанных отходов включает сортировку, помол, промывку, сушку и гомогенизацию. Полученный из смешанных отходов вторичный ПС обладает высокими физико-механическими показателями, его можно в расплавленном состоянии добавлять в асфальт и битум. При этом снижается их стоимость, и прочностные характеристики возрастают примерно на 20 %.

Значительное место среди твердых полимерных отходов занимают отходы полиамидов (ПА), образующиеся в основном при производстве и переработке в изделия волокон (капрон и анид), а также вышедшие из употребления изделия. Так как ПА – дорогостоящий материал, обладающий рядом ценных химических и физико-механических свойств, рациональное использование его отходов приобретает особую важность.

Основными направлениями переработки и использования отходов ПА можно назвать измельчение; термоформование из расплава; деполимеризацию с целью получения мономеров, пригодных для производства волокна и олигомеров с последующим их использованием в производстве клеев, лаков и других продуктов; переосаждение из раствора с получением порошков для нанесения покрытий; различные методы модификации и текстильную обработку с получением материалов волокнистой структуры [32, 83].

Переработка лавсановых волокон и изношенных изделий из ПЭТФ аналогична вторичной переработке полиамидных отходов.

За более чем 10 лет массового потребления в России напитков в упаковке из ПЭТФ на полигонах твердых бытовых отходов накопилось по некоторым оценкам более 2 млн. т использованной пластиковой тары, являющейся ценным химическим сырьем.

Существует несколько методов переработки использованных бутылок. Одной из интересных методик является глубокая химическая переработка вторичного ПЭТФ с получением диметилтерефталата в процессе метанолиза или терефталевой кислоты и этиленгликоля в ряде гидролитических процессов. Однако такие способы переработки имеют существенный недостаток – дороговизна процесса деполимеризации. Поэтому в настоящее время чаще применяются довольно известные и распространенные механохимические способы переработки, в процессе которых конечные изделия формируются из расплава полимера. Разработан значительный ассортиментный ряд изделий, получаемых из вторичного бутылочного полиэтилентерефталата. Основным крупнотоннажным производством является получение лавсановых волокон (в основном штапельных), производство синтепонов и нетканых материалов. Большой сегмент рынка занимает экструзия листов для термоформования на экструдерах с листовальными головками, и, наконец, наиболее перспективным способом переработки повсеместно признано получение гранулята, пригодного для контакта с пищевыми продуктами, т.е. получение материала для повторной отливки преформ.

Бутылочный полупродукт может быть использован в технических целях: в процессе переработки в изделия вторичный ПЭТФ можно добавлять в первичный материал; компаундирование – вторичный ПЭТФ можно сплавлять с другими пластиками (например, с поликарбонатом, с ВПЭ [84]) и наполнять волокнами для производства деталей технического назначения; получение красителей (суперконцентратов) для производства окрашенных пластиковых изделий.

В любом случае исходным сырьем для деполимеризации или переработки в изделия являются не бутылочные отходы, которые могли пролежать какое-то время на свалке и представляющие собой бесформенные сильно загрязненные объекты, а чистые хлопья ПЭТФ.

Процесс переработки бутылок в чистые хлопья ПЭТФ рассмотрен в работе [85].

Перспективным способом вторичной переработки ПЭТФ является производство бутылок из бутылок.

Главными стадиями классического процесса рециклинга для реализации схемы "бутылка к бутылке" являются: сбор и сортировка вторичного сырья; пакетирование вторичного сырья; измельчение и

промывка; выделение дробленки; экструзия с получением гранул; обработка гранул в шнековом аппарате с целью увеличения вязкости продукта и обеспечения стерилизации продукта для возможности прямого контакта с пищевыми продуктами [86]. Но для реализации этого процесса необходимы серьезные капитальные вложения, так как невозможно проведение данного процесса на стандартном оборудовании.

Выводы:

1 Существующие методы вторичной переработки отходов полимерных материалов имеют значительные недостатки, в частности захоронение и сжигание приводят к загрязнению окружающей среды и сокращению земельных угодий, термические методы и создание биоразрушаемых полимеров требуют больших финансовых затрат, сложны технологически.

2 Имеющаяся технология переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов, включающая в себя: сортировку отходов, их измельчение, промывку, сушку и гранулирование, требует значительных затрат электроэнергии, трудовых затрат, увеличения производственных площадей, что приводит к увеличению себестоимости получаемого гранулята.

3 Внедрение технологии переработки отходов пленочных термопластичных полимерных материалов на валковом оборудовании непрерывного действия позволит снизить энергозатраты, трудовые затраты, сократить производственные площади, что приведет к уменьшению себестоимости получаемого гранулята.

6. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

6.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО НЕПРЕРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Разработанный технологический процесс (рис. 6.1) вторичной переработки пленочных отходов термопластов по непрерывной технологии осуществляется следующим образом [91, 92]. Отходы с содержанием посторонних примесей не более 5 % поступают на участок сортировки отходов 1, в процессе которой из них удаляют случайные инородные включения и выбраковывают сильно загрязненные куски. Отходы полимеров 3 непрерывно загружаются через загрузочный бункер, с левой стороны валцов, на рабочие поверхности валцов 2. На валцах происходит плавление отходов, удаление летучих компонентов, пластикация, возможно модифицирование различными добавками и окрашивание расплава. Для гранулирования вальцуемого материала расплав полимера продавливается через отборочно-гранулирующее устройство 4, установленное с правой стороны валцов, на рабочие поверхности валцов, с образованием прутков (стренгов) заданного поперечного сечения.

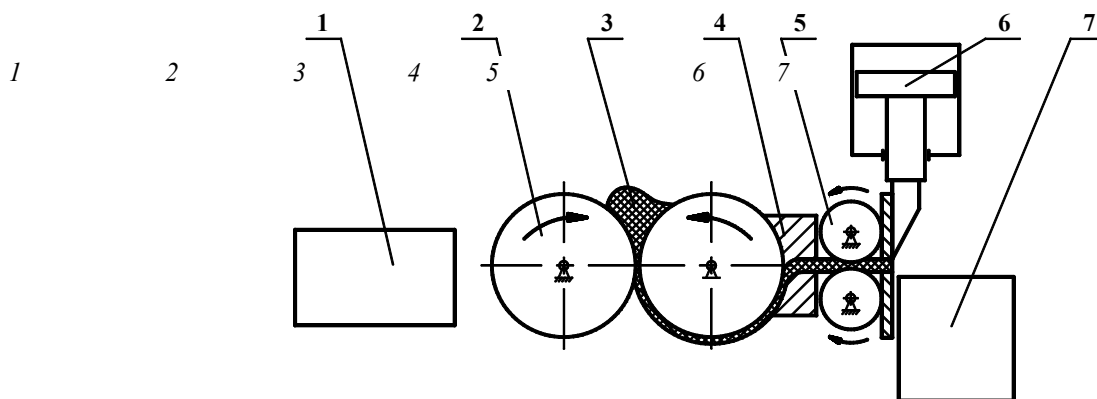


Рис. 6.1. Схема технологического процесса вторичной переработки пленочных отходов термопластов:

- 1 – участок сортировки отходов; 2 – вальцы; 3 – отходы полимеров;
4 – отборочно-гранулирующее устройство; 5 – тянущее устройство;
6 – нож; 7 – емкость для гранул

Полученные стренги сохраняют свой размер за счет установки тянущего устройства 5, далее они режутся ножом 6, после чего полученные гранулы собираются в емкости 7. По данной технологии могут перерабатываться не только пленочные отходы термопластов производственного и общественного потребления, но и различные технологические отходы термопластов [93, 94].

6.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для осуществления разработанного технологического процесса вторичной переработки отходов полимерных материалов была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (ЭУ) на базе вальцов CM 200 80/80 (рис. 6.2).

Экспериментальная установка (рис. 6.2) [95] представляет собой вальцы с полыми валками 1 диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм. Валки расположены в горизонтальной плоскости и вращаются навстречу друг другу. Регулировка частоты вращения валков осуществляется с помощью шкафа управления. Валки вальцов смонтированы в подшипниках скольжения и установлены в корпусах на станинах. Передача вращающего момента осуществляется от вала электродвигателя постоянного тока 8 типа 4ПБМ160МГМ04 через редуктор 6 на передаточные 2 и фрикционные шестерни 9.

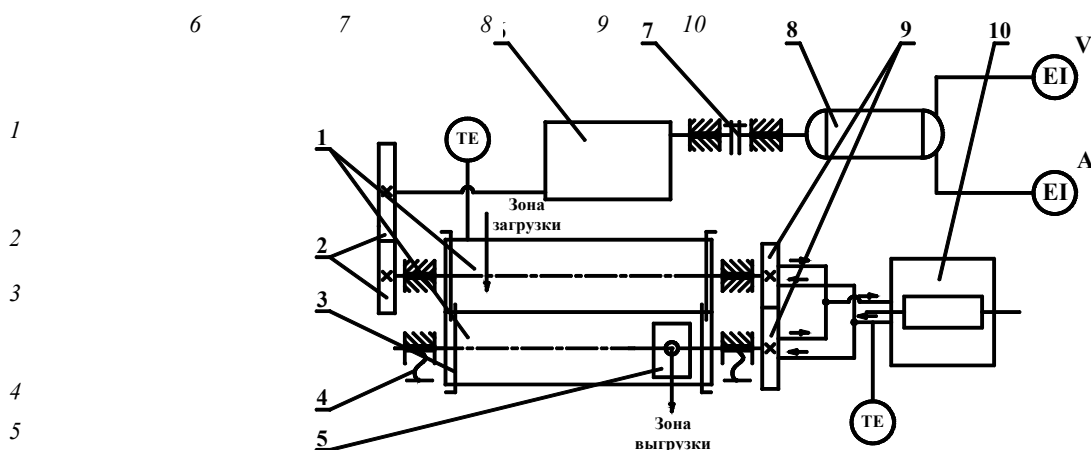


Рис. 6.2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – валки вальцов; 2 – передаточные шестерни; 3 – стрелы ограничительные;
4 – механизм регулировки зазора; 5 – отборочно-гранулирующее устройство;
6 – редуктор; 7 – муфта; 8 – электродвигатель; 9 – фрикционные шестерни;
10 – термостат; ТЕ – термопары; А – амперметр; V – вольтметр

Число оборотов валков: задний валок от 0 до 40,8 об/мин; передний валок от 0 до 30 об/мин; фрикция между валками 1 : 1; 1 : 1,2; 1 : 1,36.

Приводные и фрикционные шестерни заключены в кожухи, нижняя часть которых представляет собой масляные ванны для смазки пар. Каждая из двух станин сверху стянута поперечиной и установлена на фундаментной плите. Корпуса подшипников заднего валка закреплены в станинах неподвижно. Корпуса подшипников переднего валка установлены так, что имеют возможность перемещаться в станинах с целью регулировки зазора между валками 1. Механизм регулировки зазора 4 позволяет перемещать подшипники переднего валка по направляющим станины и фиксировать их в заданном положении. Регулировка зазора производится при помощи пары винт – гайка, расположенных по обе стороны переднего (рабочего) валка. На каждой из станин вальцов, со стороны рабочего валка, имеются указатели величины зазора для устранения перекоса валков. Механизм регулировки зазора снабжен предохра-

тельным устройством. При переработке отходов полимеров выставленная величина зазора проверялась прокатыванием между валками с левой и правой стороны свинцовых полос и измерением ее толщины ручным калибром с точностью до $\pm 0,05$ мм. Для поддержания заданного температурного режима вторичной переработки отходов полимерных материалов валки вальцов снабжены устройствами для подвода теплоносителя. Подогрев теплоносителя осуществляется в термостате 10 типа ТС-16.

Замер температуры поверхности валков производился с применением лучковой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 до и после опыта. Измерение температуры вальцуемого материала осуществлялось посредством игольчатой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 в процессе всего опыта.

С целью предотвращения попадания обрабатываемого материала в подшипники валков установлены стрелы ограничительные 3. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала достигается установкой на вальцах аварийного устройства. В ЭУ применено электродинамическое торможение. Для смазки поверхностей трущихся пар валцы снабжены системой смазки. Для обеспечения непрерывной переработки отходов валцы снабжены загрузочным бункером и отборочно-гранулирующим устройством 5. Отборочно-гранулирующее устройство выполнено двух различных видов.

Нижнее отборочно-гранулирующее устройство показано на рис. 6.3.

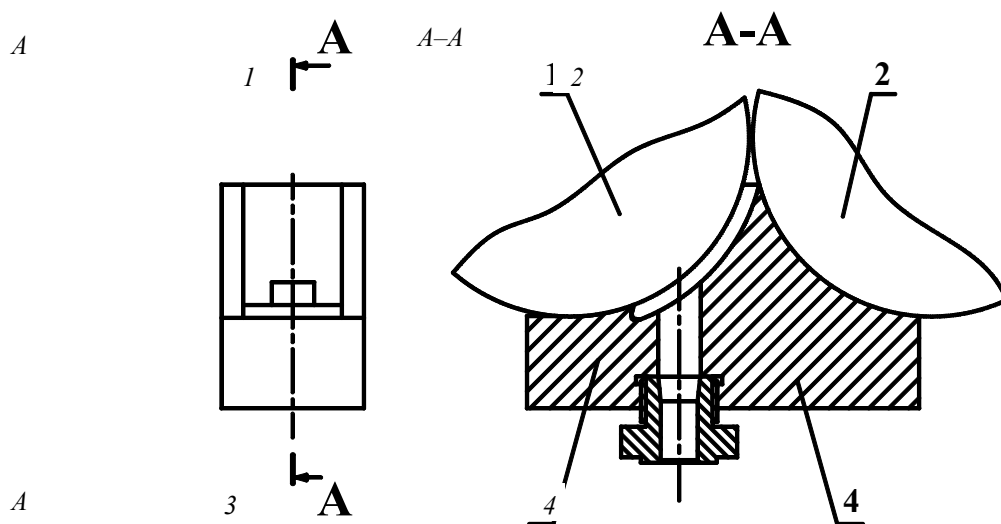


Рис. 6.3. Нижнее отборочно-гранулирующее устройство:

1 – передний валок; 2 – задний валок; 3 – фильера; 4 – башмак

Расплав полимера из зазора между валками поступает в канал плоскощелевого типа между передним валком 1 и башмаком 4 отборочно-гранулирующего устройства, далее расплав продавливается через канал башмака круглого сечения, и окончательное оформление заданного поперечного сечения стренга осуществляется в сменной фильере 2. Фильеры выполнены следующих диаметров: 4 мм, 5 мм, 6 мм.

Боковое отборочно-гранулирующее устройство показано на рис. 6.4.

Крышка, шток и демпфирующая пружина обеспечивают необходимое давление прижима экструзионной приставки к поверхности валка.

ЭУ оснащена датчиками и приборами для измерения мощности, расходуемой на процесс вальцевания, и датчиками для измерения температуры вальцуемой смеси и поверхности валков. На щите распо-

ложены вольтметр – для задания нужной частоты вращения; амперметр – для измерения тока нагрузки двигателя.

Измерение потребляемой мощности ЭУ проводили с помощью вольтамперной характеристики:

$$N = I_H U, \quad (6.1)$$

где N – мощность, расходуемая на процесс вальцевания, Вт; I_H – ток нагрузки двигателя; U – напряжение двигателя, В.

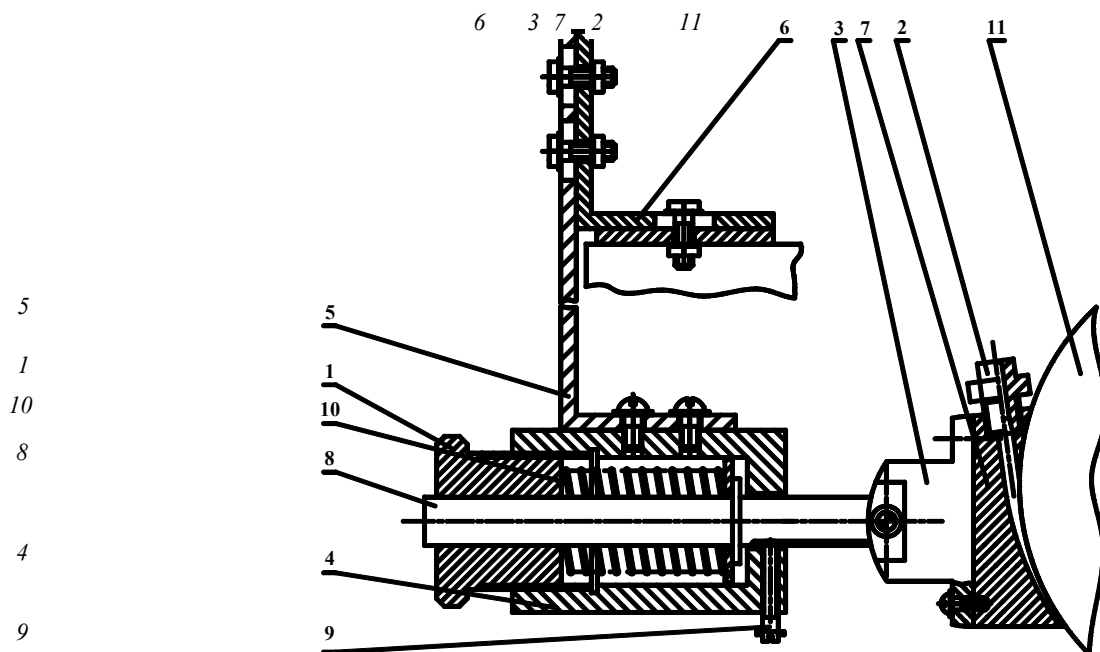


Рис. 6.4. Боковое отборочно-гранулирующее устройство:
 1 – крышка; 2 – фильера сменная; 3 – опорная пята; 4 – стакан; 5, 6 – уголок;
 7 – экструзионная приставка; 8 – шток; 9 – винт; 10 – пружина;
 11 – передний валок

6.3. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА (рис. 6.5)

Для того чтобы обеспечить заданную производительность процесса, необходимо определить, при каких геометрических размерах каналов отборочно-гранулирующего устройства выполняется следующее неравенство:

$$P_{\text{вх}} \geq \Delta P_{\text{вх.к}} + \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{вх.ф}} + \Delta P_{\text{ф}}, \quad (6.2)$$

где $P_{\text{вх}}$ – давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство; $\Delta P_{\text{вх.к}}$ – перепад давления на входе в канал круглой формы; $\Delta P_{\text{к}}$ – перепад давления в канале круглой формы; $\Delta P_{\text{вх.ф}}$ – перепад давления на входе в канал фильеры; $\Delta P_{\text{ф}}$ – перепад давления в канале фильеры.

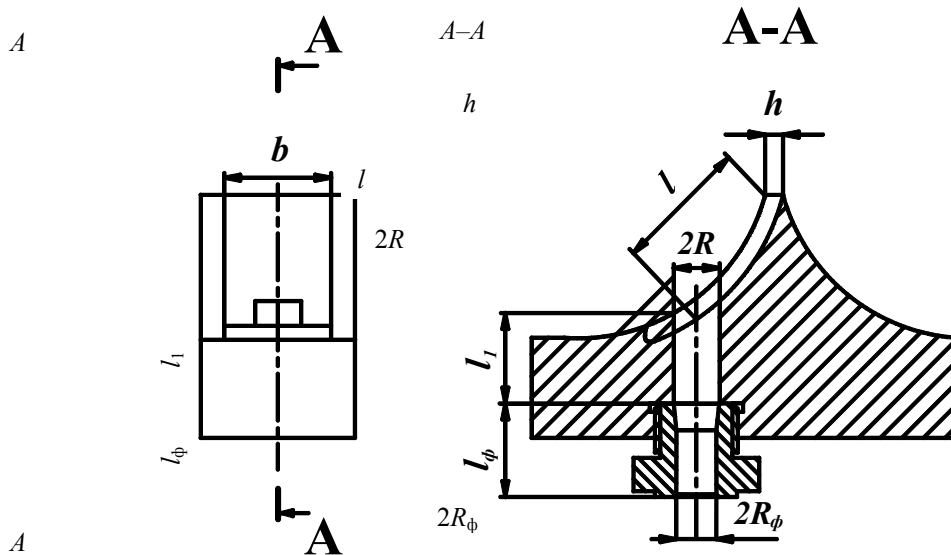


Рис. 6.5. К расчету геометрических размеров отборочно-гранулирующего устройства

6.3.1. Определение давления на входе в отборочно-гранулирующее устройство

Расчет ведем как для процесса экструзии. Считаем, что плоскощелевой канал, образованный рабочей поверхностью переднего валка и поверхностью отборочно-гранулирующего устройства, есть не что иное, как экструдер, где поверхность отборочно-гранулирующего устройства является разверткой поверхности впадин нарезки червяка, а поверхность валка движется относительно поверхности отборочно-гранулирующего устройства, как развертка поверхности цилиндра экструдера. Объем жидкости, протекающей в единицу времени через участок шириной b сечения потока, определяется интегрированием произведения скорости на площадь экспериментального участка F высотой dy [87]:

$$Q = \int_{-1}^1 \frac{bm\tau_{np}^n h^2}{n+1} F dy, \quad (6.3)$$

где n и m – реологические константы; τ_{np} – предельное напряжение сдвига; h – высота канала.

$$F = \int_{-1}^1 (1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1} dy. \quad (6.4)$$

После интегрирования

$$F = \frac{(1+X)^{n+2} - (X-1)^{n+2}}{n+2} - 2(1-X)^{n+1}. \quad (6.5)$$

Скорость стенки канала (переднего валка) определяется по формуле

$$u = \frac{m\tau_{np}^n h}{n+1} \Phi, \quad (6.6)$$

где $\Phi = (1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1}. \quad (6.7)$

Введем обозначения:

$$q = \frac{u}{m\tau_{\text{пр}}^n h} = \frac{\Phi}{n+1} = \frac{(1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1}}{n+1}; \quad (6.8)$$

$$u_1 = \frac{Q}{bm\tau_{\text{пр}}^n h^2} = \frac{(1+X)^{n+2} - (X-1)^{n+2} - 2(n+2)(1-X)^{n+1}}{(n+1)(n+2)}; \quad (6.9)$$

$$\bar{u} = \frac{u_1}{q} = \frac{Q}{bhu} = \frac{(1+X)^{n+2} - (X-1)^{n+2} - 2(n+2)(1-X)^{n+1}}{(n+2)((1+X)^{n+1} - (1-X)^{n+1})}. \quad (6.10)$$

Давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство, определяется по формуле [87]:

$$P_{\text{вх}} = \frac{\tau_{\text{пр}}^l}{h}, \quad (6.11)$$

где l – длина канала.

Для определения $\tau_{\text{пр}}$ необходимо знать X . Задавая значение X и подставляя его в формулу (2.10) получим \bar{u} . С другой стороны, при заданной производительности Q значение \bar{u} является постоянной величиной и определяется по формуле:

$$\bar{u} = \frac{Q}{bhu}, \quad (6.12)$$

где u – скорость вращения переднего вала.

Построив графическую зависимость $\bar{u} = f(X)$, найдем X при котором значение \bar{u} как функции от X , будет равняться значению \bar{u} , найденному по формуле (6.12).

Найденное значение X подставляем в выражение (6.8) и находим q .

Из уравнения (6.8) получим формулу для определения $\tau_{\text{пр}}$:

$$\tau_{\text{пр}}^n = \left[\frac{u}{mqh} \right]^{1/n}. \quad (6.13)$$

Подставляя значение $\tau_{\text{пр}}$ в выражение (6.11), находим давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство.

6.3.2. Определение перепада давления на входе в канал круглой формы

Перепад давления на входе в канал круглой формы определяется по формуле [88]

$$\Delta P_{\text{вх.к}} = \left[\frac{Q(n+3)}{\pi R^3 m} \right]^{1/n} \frac{S}{n+3}, \quad (6.14)$$

где Q – заданная производительность; n и m – реологические константы; R – радиус канала круглой формы; S – постоянная величина.

6.3.3. Определение перепада давления в канале круглой формы

Перепад давления в канале круглой формы определяется по формуле [88]

$$\Delta P_{\text{к}} = \left[\frac{Q(n+3)}{\pi R^{(n+3)} m} \right]^{1/n} 2l_1, \quad (6.15)$$

где l_1 – длина канала круглой формы.

6.3.4. Определение перепада давления на входе в канал фильеры

Поскольку канал фильеры имеет круглую форму, то перепад давления на входе в канал фильеры определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{вх.ф}} = \left[\frac{Q(n+3)}{\pi R_{\text{ф}}^3 m} \right]^{1/n} \frac{S}{n+3}, \quad (6.16)$$

где Q – заданная производительность; n и m – реологические константы; $R_{\text{ф}}$ – радиус канала фильеры; S – постоянная величина.

6.3.5. Определение перепада давления в канале фильеры

Перепад давления в канале фильеры определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{ф}} = \left[\frac{Q(n+3)}{\pi R_{\text{ф}}^{(n+3)} m} \right]^{1/n} 2l_{\text{ф}}, \quad (6.17)$$

где $l_{\text{ф}}$ – длина канала фильеры.

Если давление, создаваемое на входе в отборочно-гранулирующее устройство, $P_{\text{вх}}$ получится меньше суммы перепадов давлений $\Delta P_{\text{вх.к}}$, $\Delta P_{\text{к}}$, $\Delta P_{\text{вх.ф}}$, $\Delta P_{\text{ф}}$, то необходимо изменить геометрические размеры каналов и повторить расчет.

Объект исследования. В качестве объекта исследования принят непрерывный процесс вальцевания пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления, а также первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020 на ЭУ. Пленочные отходы ПЭНП производственного и общественного потребления выбраны в качестве объекта исследования в связи с тем, что они составляют 30 % от всего объема пленочных отходов термопластов.

6.1. Свойства первичного ПЭНП
(марка 15803-020, натуральный, сорт – высший)

Наименование показателя	Значение
1. Размер гранул, мм	от 2 до 5
2. Плотность ρ , г/см ³	0,919 ±0,01
3. Показатель текучести расплава с доп. в %, I , г/10 мин	1,8 ±6
4. Предел текучести при растяжении σ_T , Па (кГс/см ²)	93·10 ⁵ (95)
5. Прочность при разрыве σ_p , Па (кГс/см ²)	150·10 ⁵ (153)
6. Относительное удлинение при разрыве ϵ , %	780,5
7. Реологические свойства при температуре переработки ($t = 130$ °С) – индекс течения n – коэффициент консистентности K , МПа · с	0,2 0,2

6.2. Требования, предъявляемые к перерабатываемым пленочным отходам ПЭНП

Наименование показателя	Значение
1. Допускаемое загрязнение, %, не более	3 – 5
2. Количество включений стекла, металла, резины, машинного масла	Не допускается
3. Время эксплуатации и пребывания	3

ния свалке, лет, не более	на	
4. Включения других термопластичных полимерных материалов, %, не более		2 – 3

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ВАЛЬЦАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Целью экспериментальной работы является исследование влияния различных технологических параметров процесса вальцевания (величины минимального зазора между валками, величины фрикции, частоты вращения валков, величины "запаса" материала на валках) и конструктивных параметров оборудования (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, геометрических размеров фильеры) на свойства и производительность получаемого гранулята с целью выбора параметров управления.

7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОЧНЫХ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Реологические свойства пленочных отходов полиэтилена низкой плотности определяли методом капиллярной вискозиметрии.

Для определения реологических констант: K – коэффициента консистентности и n – индекса течения, который указывает на степень отклонения течения исследуемой жидкости от ньютоновского течения, использовали грузовой капиллярный вискозиметр ИИРТ-М, который соответствует ГОСТу 11645–73. В зависимости от вида исследуемого полимера в соответствии с ГОСТ был выбран длинный капилляр длиной 30 мм и короткий капилляр длиной 20 мм, диаметр обоих капилляров равен 2 мм. В зависимости от температуры переработки выбрали температуру испытания 130 °С, использовали грузы массой 3,8; 5; 7,6; 10 и 17,95 кг. Перед испытаниями вискозиметр прогревали в течение одного часа. После этого устанавливали в камеру прибора длинный капилляр, заполняли камеру гранулами и вводили в нее поршень с грузом 3,8 кг. Устанавливали ножку индикатора часового типа так, чтобы она касалась поверхности грузов. Через 10 мин (время прогрева термопласта) освобождали груз, под действием которого полимер начинал продавливаться через капилляр. С помощью секундомера измеряли время, за которое стрелка индикатора сделает 10 оборотов, что соответствует ходу поршня 10 мм. После этого устанавливали следующий груз массой 5 кг и проводили измерения в той же последовательности. Далее заменяли длинный капилляр коротким и проводили на коротком капилляре те же измерения, что и на длинном, для всех грузов.

После этого проводили обработку экспериментальных данных и определяли реологические константы K и n по методике, включающей в себя:

1. Расчет давления под поршнем P_n (Н/м²) по формуле:

$$P_n = \frac{4mg}{\pi D^2}, \quad (7.1)$$

где m – масса груза, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; D – диаметр поршня, равный $9,54 \cdot 10^{-3}$ м.

2. Расчет объемного секундного расхода Q_v ($\text{м}^3/\text{с}$) по формуле:

$$Q_v = \frac{\pi D^2 h_{\text{п}}}{4 t_{\text{п}}}, \quad (7.2)$$

где $h_{\text{п}}$ – путь, пройденный поршнем за время работы секундомера, $h_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $t_{\text{п}}$ – время, регистрируемое секундомером, с.

3. Построение графической зависимости Q_v от $P_{\text{п}}$ для короткого и длинного капилляров.

4. Определение для четырех значений Q_v величин $\Delta P_{\text{п}}$, соответствующих длине короткого и длинного капилляров и построение графика зависимости Q_v от $\Delta P_{\text{п}}$.

5. Расчет напряжения сдвига на стенке капилляра σ_R по формуле:

$$\sigma_R = R_k \frac{P_{\text{п}2} - P_{\text{п}1}}{2(l_{\text{к}2} - l_{\text{к}1})} = R_k \frac{\Delta P_{\text{п}}}{2l_{\text{к}}}, \quad (7.3)$$

где R_k – радиус капилляра, м; $P_{\text{п}1}$ и $P_{\text{п}2}$ – перепады давлений, соответственно, в коротком и длинном капиллярах при равных расходах, Н/м^2 ; $l_{\text{к}1}$ и $l_{\text{к}2}$ – длины, соответственно короткого и длинного капилляров, м.

6. Расчет истинной скорости сдвига γ_R на стенке капилляра, исходя из уравнения Рабиновича, по формуле:

$$\gamma_R = \frac{1}{\pi R^3} \left(3Q_v + \Delta P_{\text{п}} \frac{dQ_v}{d\Delta P_{\text{п}}} \right), \quad (7.4)$$

где величина $dQ_v / d\Delta P_{\text{п}}$ находится графическим дифференцированием зависимости Q_v от $\Delta P_{\text{п}}$. Величина $dQ_v / d\Delta P_{\text{п}}$ представляет собой тангенс угла наклона касательных к графику зависимости Q_v от $\Delta P_{\text{п}}$ в точках Q_{v1} , Q_{v2} , Q_{v3} , Q_{v4} , Q_{v5} .

7. Построение кривой течения в координатах $\lg \sigma_R - \lg \gamma_R$ (рис. 7.1) и вычисление значений реологических констант K и n .

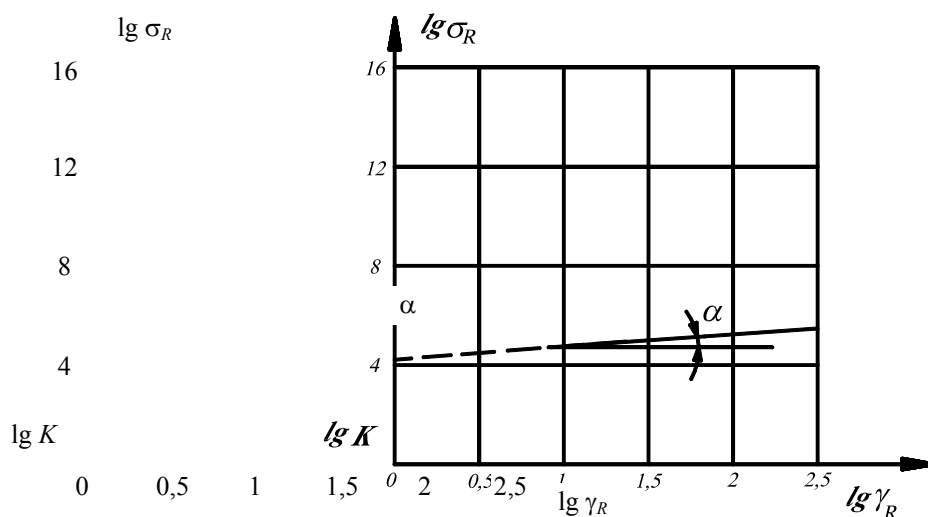


Рис. 7.1. Зависимость напряжения сдвига σ_R от скорости сдвига γ_R в логарифмических координатах

Величина $\lg K$ определяется как отрезок, отсекаемый на оси ординат при $\lg \gamma_R = 0$. Величина n определяется как тангенс угла наклона к кривой течения.

В результате расчета были найдены реологические свойства пленочных отходов полиэтилена низкой плотности производственного и общественного потребления: $n = 0,22$; $K = 0,11$ МПа · с.

7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КООРДИНАТ СЕЧЕНИЯ ВХОДА X_H И ВЫХОДА X_K

Измерение координаты сечения входа x_H производили следующим образом. После выхода на заданный, установившийся режим вальцевания вальцы останавливали и проводили измерение величин c и e , показанных на рис. 7.2.

Величина координаты сечения входа x_H определяется следующим образом:

$$x_H = R + c - e. \quad (7.5)$$

Величина безразмерной координаты сечения входа X_H определяется по формуле:

$$X_H = \frac{x_H}{\sqrt{2Rh_{02}}}. \quad (7.6)$$

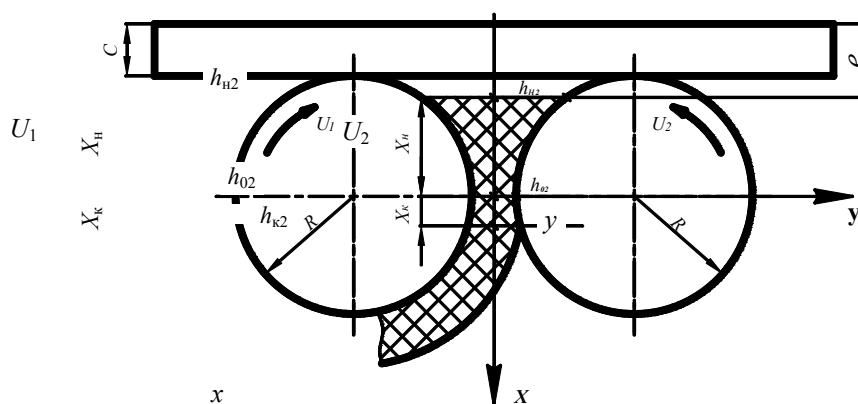


Рис. 7.2. Определение координаты сечения входа x_H

Между безразмерными координатами входа X_H и выхода X_K существует зависимость [103]:

$$\int_{X_H}^{X_K} \frac{(X_K^2 - X^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} - \int_{X_K}^{-X_K} \frac{(X - X_K^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} = 0. \quad (7.7)$$

Решая это интегральное уравнение численными методами, находим при каждом значении индекса течения n безразмерную координату сечения входа X_H , которой соответствует единственное значение

безразмерной координаты сечения выхода X_k . На рис. 7.3 дана зависимость X_k от X_n при различных значениях n .

Для определения оптимального объема материала на валках необходимо знать, при какой величине безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки X_{nn} величина удельной мощности P , характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал, будет максимальной. Удельная мощность P рассчитывается по формулам [90, 91]:

$$P = \frac{N_n}{V} = \mu \left(\frac{U_1}{h_{02}} \right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n F_0 \left(X_k, n, \frac{R}{h_{02}} \right), \quad (7.8)$$

где N_n – технологическая мощность, расходуемая на деформацию обрабатываемого материала в зазоре валков вальцов, работающих по непрерывному режиму, кВт; V – величина объема материала, находящегося на валках вальцов, m^3 ; μ – вязкость материала, $Pa \cdot c$; U_1 – частота вращения переднего валка, об/мин; h_{02} – половина величины минимального зазора между валками, м; R – радиус валка, м.

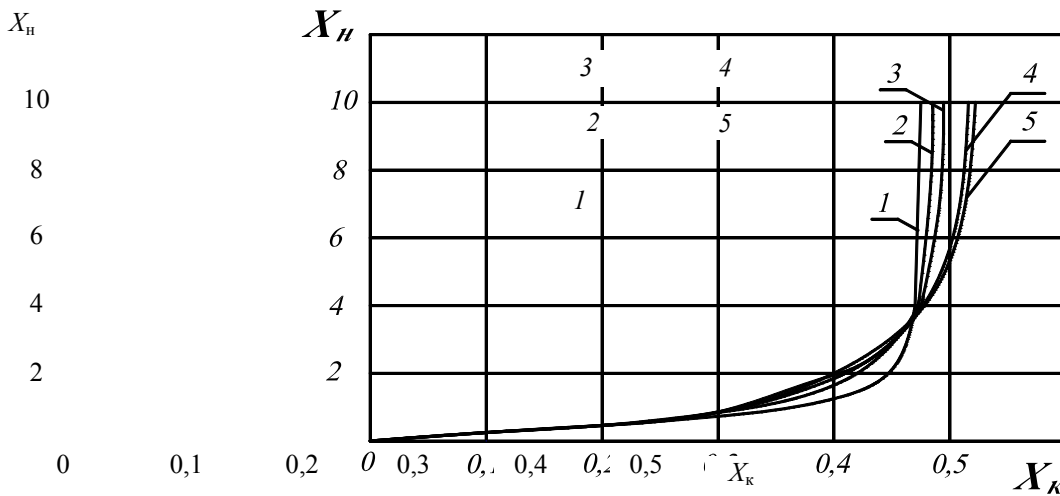


Рис. 7.3. Зависимость безразмерной координаты сечения выхода X_k от безразмерной координаты сечения входа X_n при различных значениях n :

$1 - n = 1; 2 - n = 0,5; 3 - n = 0,38; 4 - n = 0,2; 5 - n = 0,125$

$$F_0 \left(X_k, n, \frac{R}{h_{02}} \right) = \frac{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \int_{X_k}^{X_n} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)^n}{(1+X^2)^{2n}} \Psi(X_k) dX dX_k}{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{R}} (1+X_k^2) \left[\frac{R}{h_{02}} + (1+X_k^2) \right] - (1+X_k^2)(X_k + X_n) + X_n + X_k + \frac{1}{3}(X_n^3 + X_k^3) \right\} \Psi(X_k) dX_k}, \quad (7.9)$$

где

$$\Psi(X_k) = \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} \times$$

$$\times (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) +$$

$$+ 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) -$$

$$- 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) -$$

$$- X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) +$$

$$+ 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2). \quad (7.10)$$

Рассчитаны (программа 9, прил. Е) и построены графические зависимости удельной мощности P от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{\text{нн}}$ (для трех различных значений R/h_{02}) показанные на рис. 7.4.

$$F_0 \left(X_k, n, \frac{R}{h_{02}} \right)$$

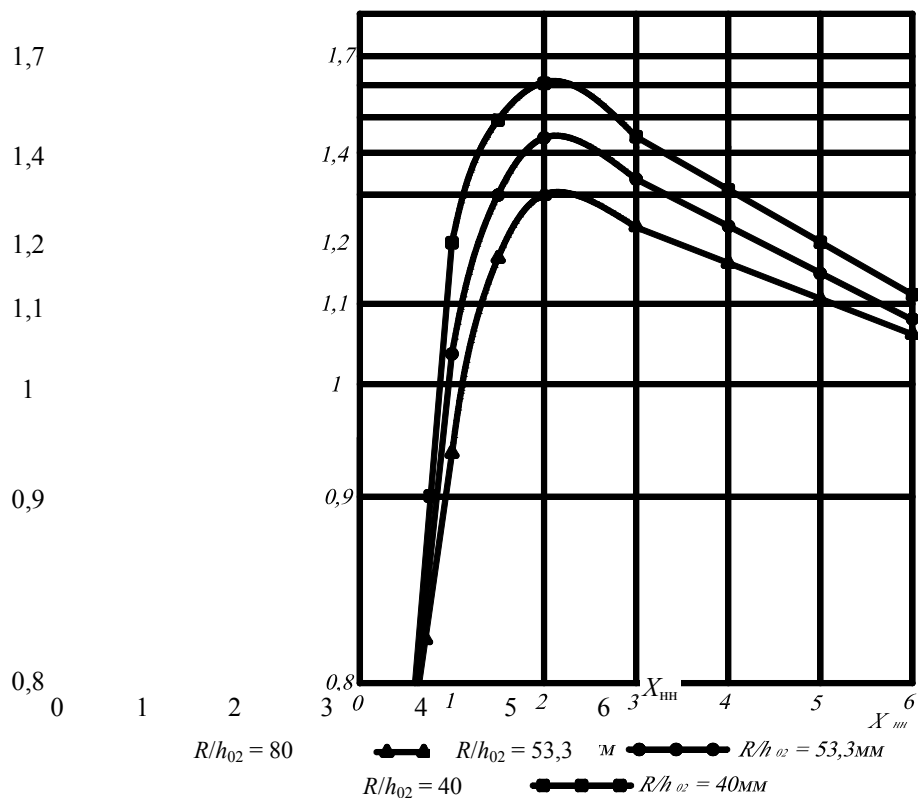


Рис. 7.4. Зависимость удельной мощности от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{\text{нн}}$ для трех различных значений R/h_{02} при $n = 0,2$

Анализ рис. 7.4 показывает наличие максимума в области $X_{\text{нн}} = 2,1$. Следовательно, существует такой оптимальный объем материала на валках, при котором работа, затрачиваемая на его деформацию, будет максимальной. Поэтому ведение непрерывного процесса вальцевания пленочных отходов термопластов с таким объемом загрузки будет наиболее рационально с точки зрения интенсивности механического воздействия на обрабатываемый материал.

7.3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовательская работа выполнена на описанной выше экспериментальной установке. На данной установке осуществляли изотермический режим непрерывного процесса вальцевания первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020, а также пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления. Переработку проводили при изменении в широком диапазоне частоты вращения валков, диаметра фильеры, величины минимального зазора между валками, величины фрикции [97 – 100].

Эксперимент проводили следующим образом: включали питание ЭУ; устанавливали заданный минимальный зазор между валками h_0 ; монтировали отборочно-гранулирующее устройство с фильерой заданного диаметра d_f ; устанавливали фрикцию между валками f ; разогревали до заданной температуры поверхности валков; устанавливали частоту вращения переднего валка $u = 5$ об/мин; непрерывно загружали с левой стороны вальцов первичный полиэтилен низкой плотности; вальцевали полиэтилен, проверяли точность зазора между валками и измеряли температуру расплава; после выхода на заданный, установившийся режим гранулирования регистрировали показания амперметра, вес полученных гранул за определенный промежуток времени с целью определения производительности; полученные гранулы собирали в емкости для последующего определения показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве. Затем валковую установку останавливали, и валки полностью очищали от материала. После этого устанавливали частоту вращения переднего валка $u = 10$ об/мин и проводили те же действия. Такой же порядок действий при $u = 15; 20; 25; 30$ об/мин.

Показатель текучести расплава гранул, полученных при непрерывном процессе вальцевания, определяли по следующей методике.

Для определения показателя текучести расплава использовали грузовой капиллярный вискозиметр ИИРТ-М, который соответствует ГОСТу 11645–73. В зависимости от вида исследуемого полимера в соответствии с ГОСТ выбрали капилляр диаметром 2 мм, температуру испытания 190 °С, груз массой 2,16 кг. Перед испытаниями вискозиметр прогревали в течение одного часа. После этого заполняли камеру прибора гранулами и вводили в нее поршень с грузом. Через 10 мин (время прогрева термопласта) освобождали груз, под действием которого полимер начинал продавливаться через капилляр. При истечении полимера через капилляр срезали прутки (до 10 штук) за установленный промежуток времени – 60 с, который засекали по секундомеру. Прутки, которые содержали пузырьки воздуха – забраковывали. На аналитических весах определяли массу срезанных прутков с точностью до 0,001 г.

Показатель текучести расплава I (г/10 мин) определяли по формуле:

$$I = 600m/t, \quad (7.11)$$

где m – масса прутка, г; t – время истечения прутка, с.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных определений для каждого эксперимента.

Предел текучести при растяжении, прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве гранул, полученных по непрерывному процессу вальцевания, определяли по следующей методике.

Гранулы закладывались в пресс-форму, которую устанавливали в пресс. Гранулы прессовали при температуре 160 °С при давлении 100 кгс/см² в течение 15 мин. Из полученных прессованием пластин вырубались образцы, показанные на рис. 7.5.

Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 11262–68 (табл. 7.1). Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, раковин и других дефектов. Для каждого опыта использовалось не менее пяти образцов.

l

l_0

B

h b

A

L

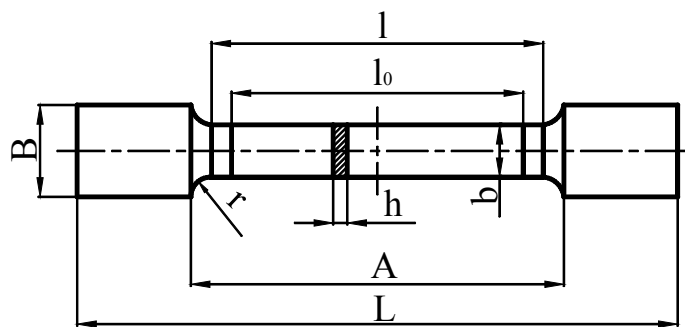


Рис 7.5. Образец для испытания на растяжение
7.1. Размеры образцов для испытания на растяжение

Наименование	Обозначение	Значение, мм
Общая длина	L	40
Ширина головки	B	7
Длина рабочей части	l	18
Ширина рабочей части	b	3,5
Размеры закруглений	r	3
Расстояние между метками	A	21
Толщина рабочей части	h	2
Начальная база образца	l_0	16

Испытания проводились на разрывной машине СМГИ-Ц-250. Скорость раздвижения захватов в испытательной машине 28 мм/мин. Перед испытанием измеряли толщину и ширину образцов в их рабочей части с точностью до 0,01 мм не менее чем в трех местах. Образцы, у которых результаты измерений толщины и ширины рабочей части различались больше, чем на 0,2 мм, заменялись другими.

Перед испытанием на образец наносили метки, ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Нанесение меток не должно приводить к изменению свойств образца и к его разрушению по меткам. Образец закрепляли в захваты разрывной машины по меткам, определяющим положение кромок захватов на образце, так, чтобы исключить его скольжение в процессе испытания, при этом разрушение его не должно происходить в месте закрепления. Продольная ось образца должна совпадать с осью захватов и направлением движения подвижного захвата.

В момент достижения предела текучести и разрушения измеряли нагрузку и удлинение. В расчет принимали результаты, полученные на образцах, разрушившихся в пределах рабочей части.

Предел текучести при растяжении σ_T , и прочность при разрыве σ_P вычисляли по формулам:

$$\sigma_T = P_T / bh; \quad (7.12)$$

$$\sigma_p = P_p / bh, \quad (7.13)$$

где P_T – нагрузка в момент достижения предела текучести, кГс; P_p – нагрузка при которой образец разрушился, кГс; b, h – ширина и толщина рабочей части образца, см.

Относительное удлинение при разрыве ε вычисляли по формуле:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \cdot 100, \quad (7.14)$$

где Δl – приращение образца при разрыве, мм.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных определений для каждого эксперимента.

7.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВОЙСТВ ГРАНУЛЯТА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЖНЕГО ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Первоначально проводили эксперименты по определению зависимости показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, предела прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от частоты вращения переднего валка при различных диаметрах фильеры, величине минимального зазора между валками, фрикции. Исследовали непрерывный процесс переработки на вальцах первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. Использовали нижнее отборочно-гранулирующее устройство (рис. 6.3).

По описанной выше методике проводили эксперименты при диаметрах фильеры d_ϕ 4; 5 и 6 мм; величинах минимального зазора между валками h_0 1; 1,5 и 2 мм; величинах фрикции между валками f 1 : 1; 1 : 1,2 и 1 : 1,36.

После обработки экспериментальных данных были получены графические зависимости, показанные на рис. 7.6 – 7.14.

Анализ графических зависимостей (рис. 7.6 – 7.8) дает возможность сделать вывод, что изменение диаметра фильеры существенно не влияет на свойства получаемого гранулята, а поскольку максимальный размер гранул по ГОСТу должен быть не более 5 мм, то в дальнейших исследованиях используем фильеру с диаметром 5 мм. Изменения величины зазора между валками (рис. 3.9 – 3.11) и величины фрикции (рис. 7.12 – 7.14) также не оказывают существенного влияния на физико-механические показатели гранулята. Основным параметром, оказывающим влияние, является частота вращения валка.

Из графических зависимостей (рис. 7.6 – 7.14) видно, что наилучшие свойства переработанного первичного полиэтилена достигаются при частоте вращения переднего валка $u = 20$ об/мин, диаметре фильеры $d_\phi = 5$ мм, величине минимального зазора между валками $h_0 = 1,5$ мм, величине фрикции $f = 1 : 1,2$.

7.5. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВОЙСТВ ГРАНУЛЯТА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БОКОВОГО ОТБОРОЧНО-ГРАНУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Далее были проведены эксперименты по определению зависимостей показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от частоты вращения переднего валка при различных диаметрах фильеры, величине минимального зазора между валками, фрикции. Исследовали непрерывный процесс переработки на вальцах первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. Использовали боковое отборочно-гранулирующее устройство (рис. 6.4).

Эксперименты проводили в такой же последовательности, как при использовании нижнего отборочно-гранулирующего устройства.

После обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости (рис. 7.15 – 7.19) для сравнения свойств переработанного полиэтилена, производительности процесса, удельной мощности, затрачиваемой на 1 кг продукции, при использовании нижнего и бокового отборочно-гранулирующих устройств.

Из анализа этих зависимостей можно сделать вывод, что использование нижнего или бокового отборочно-гранулирующего устройства не оказывает существенного влияния на свойства получаемого

гранулята. Однако при использовании бокового отборочно-гранулирующего устройства производительность возрастает в 2,2 раза, а удельная мощность уменьшается в 2,4 раза по сравнению с этими же показателями при использовании нижнего отборочно-гранулирующего устройства.

7.6. СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ГРАНУЛЯТА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ПЕРВИЧНОГО ПЭНП И ИЗ ПЛЕНОЧНЫХ ОТХОДОВ ПЭНП ПРИ НАЙДЕННЫХ РЕЖИМАХ ПЕРЕРАБОТКИ

После этого исследовали непрерывный процесс переработки на ЭУ пленочных отходов ПЭНП производственного и общественного потребления при найденном оптимальном режиме гранулирования: диаметре фильеры $d_{\phi} = 5$ мм, величине минимального зазора между валками $h_0 = 1,5$ мм, фрикции $f = 1 : 1,2$. Использовали боковое отборочно-гранулирующее устройство [101].

Были проведены эксперименты по определению зависимости показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от частоты вращения переднего вала. Эксперименты проводили в такой же последовательности, как при исследовании непрерывного процесса переработки на ЭУ первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. После обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости (рис. 7.20 – 7.22) для сравнения свойств гранул, полученных из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления, и гранул, полученных из первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020.

Из анализа графических зависимостей (рис. 7.20 – 7.22) можно сделать вывод, что характер кривых зависимостей свойств гранул, полученных из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления, аналогичен поведению кривых зависимостей свойств гранул, полученных из первичного полиэтилена низкой плотности марки 15803-020. Это подтверждает найденный оптимальный режим пере-

работки полиэтилена на вальцах по непрерывной технологии. Ухудшение прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве, увеличение показателя текучести расплава гранул, полученных из отходов ПЭНП производственного и общественного потребления, вызвано влиянием различных факторов на материал при его первичной переработке, эксплуатации и хранении (температура, влажность, воздействие солнечного излучения и т.д.).

7.7. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПЛЕНОЧНЫХ ОТХОДОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

В настоящее время наибольшее количество отходов пленочных термопластичных полимерных материалов перерабатывается по двум технологиям:

- 1) экструзионным методом;
- 2) с использованием дискового агломератора.

В работе проведено сравнение свойств гранул, получаемых из отходов полиэтилена низкой плотности производственного и общественного потребления на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия, со свойствами гранул, получаемых по двум указанным выше технологиям.

Свойства гранулята приведены в табл. 7.2.

7.2. Свойства гранулята

Характеристики	ВПЭНП		
	полученный экструзи- онным методом	получен- ный на дис- ковом агломе- раторе	полученный на валко- вом пластика- торе- грануля- торе непре- рывного действия

Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	10	9,7	13,31
Относительное удлинение при разрыве, %	505	425	673,3
Показатель текучести расплава, г/10 мин	2,4	2,7	2,3
Удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции, кВт/кг	0,25	0,22	0,19

Анализируя данные, указанные в табл. 7.2, можно сделать вывод, что разрушающее напряжение при растяжении вторичного полиэтилена, полученного на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия, в 1,3 раза выше, чем разрушающее напряжение вторичного полиэтилена, полученного экструзионным методом, и в 1,4 раза выше, чем разрушающее напряжение вторичного полиэтилена, полученного с использованием дискового агломератора. Относительное удлинение при разрыве вторичного полиэтилена, полученного на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия, в 1,3 раза выше, чем относительное удлинение при разрыве вторичного полиэтилена, полученного экструзионным методом, и в 1,6 раза выше, чем относительное удлинение при разрыве вторичного полиэтилена, полученного с использованием дискового агломератора. Удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции вторичного полиэтилена, полученного на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия в 1,3 раза ниже, чем удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции вторичного полиэтилена, полученного экструзионным методом, и в 1,15 раз ниже, чем удельная мощность, затрачиваемая на производство 1 кг продукции вторичного полиэтилена, полученного с использованием дискового агломератора.

Следовательно, наиболее экономичной с точки зрения затрачиваемой мощности и обеспечивающей лучшие свойства вторичного полиэтилена является технология переработки отходов полиэтилена низкой плотности производственного и общественного потребления на валковом пластикаторе-грануляторе непрерывного действия.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

8.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТОВ

При вальцевании существенное влияние на качественные показатели получаемого гранулята (предел прочности, относительное удлинение при разрыве) оказывает суммарная величина сдвига, которая зависит от различных технологических (частоты вращения валков, величины минимального зазора между валками, фрикции, "запаса" материала на валках) и конструктивных (конструкции отборочно-гранулирующего устройства, диаметра и длины фильеры) параметров процесса.

8.1.1. Определение величины сдвига вдоль оси X

Средняя удельная деформация сдвига, реализуемая за один проход при вальцевании с фрикцией, определяется выражением [89]:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_x = & \left\{ 1,5 \left[(1 - X_k^2) \operatorname{arctg} \frac{X_k - X_H}{1 - X_H X_k} + \frac{1 + X_k^2 X_H}{1 + X_H^2} - X_k^2 \right] \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda(1 + X_k^2)} + \right. \\ & + \frac{1 - 2\lambda^2(1 + X_k^2)}{2(1 + X_k^2)[1 - \lambda^2(1 + X_k^2)]} \left(\frac{X_k}{1 + X_k^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{arctg} \frac{X_k - X_H}{1 - X_H X_k} \right) \right\} [2,8h_{02} l_B (1 + X_k^2)(X_k - X_H)]^{-1}, \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$\text{где} \quad X_H = \frac{x_H}{\sqrt{2Rh_{02}}}; \quad X_k = \frac{x_k}{\sqrt{2Rh_{02}}}; \quad (8.2)$$

x_H – величина координаты сечения входа, м; x_k – величина координаты сечения выхода, м; R – радиус валка, м; h_{02} – половина величины зазора между валками, м; $\lambda = (U_1 - U_2)/2U_0$, где U_2 – окружная скорость заднего валка, м/с; U_1 – окружная скорость переднего валка, м/с; $U_0 = (U_1 + U_2)/2$ – среднее значение окружной скорости валков; l_B – длина рабочей части валка вальцов, м.

Величина сдвига вдоль оси X определяется по формуле [89]:

$$\gamma_x = \tilde{\gamma}_x i(t), \quad (8.3)$$

где $i(t)$ – число проходов.

$$i(t) = \frac{U_0 t (1 + X_k^2)}{(X_k - X_H) \sqrt{2Rh_{02}}}, \quad (8.4)$$

где t – продолжительность (время) вальцевания.

8.1.2. Определение суммарной величины сдвига

Для определения суммарной величины сдвига – вдоль оси X и вдоль оси Z (непрерывный режим работы валкового оборудования) сделаны следующие допущения:

1. Разбиваем длину валка на множество элементарных участков z_j (рис. 8.1), соответствующих j -му проходу.

Суммарную величину сдвига определяем по формуле [102, 103]:

$$\gamma_c = \sum_{j=1}^k \gamma_j, \quad (8.5)$$

где γ_j – величина сдвига за один проход, определяется по формулам (8.1), (8.2), в которых $l_b = z_j$;

$$z_j = \sum_{i=1}^n dz_i; \quad dz_i = dl_i \cos \varphi_i; \quad \operatorname{tg} \varphi_i = v_{xi} / v_{zi};$$

v_{xi} – скорость течения материала вдоль оси X , определяется по формуле (4.6); v_{zi} – скорость течения ма-

териала вдоль оси Z , определяется по формуле (4.7, 4.8); $l_{bj} = \sum_{i=1}^n dl_i$ – путь, пройденный материалом за

один проход в зоне деформирования;

$$dl_i = (X_i - X_{i-1}) / \sin \varphi_i; \quad k - \text{число проходов, при котором } \sum_{j=1}^k z_j = l_b,$$

где l_b – длина рабочей части валка.

$$v_{xi} = -\frac{U_0}{1+X^2} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{Y}{H} \right)^2 (X^2 - X_k^2) + \frac{2-X^2+3X_k^2}{2} + \left(\frac{Y}{H} \right)^2 \lambda (1+X^2) \right], \quad (8.6)$$

где $H = \frac{h_2}{\sqrt{2Rh_{02}}}$ – безразмерная координата.

$$v_{zi} = \frac{3QW}{4h_{02}\sqrt{2Rh_{02}}}, \quad (8.7)$$

где

$$W = (1+X^2) \left[\left(\frac{Y}{H} \right)^2 - 1 \right] \times \frac{-\frac{2X^2(5+3X^2)}{(1+X^2)^2}}{\left\{ AX - 3,4X_k X^2 - AX^3 - 3,34X_k X^4 + 0,6AX^5 - 0,86X_k X^6 + 0,143AX^7 - \frac{-6X_k \operatorname{arctg} X + A}{-6X_k [(X + X^3 + 0,6X^5 + 0,143X^7) \operatorname{arctg} X - 0,23 \ln(1+X^2)]} \right\} \Big|_{X_H}^{X_k}}; \quad (8.8)$$

$A = 6X_k \operatorname{arctg} X_k + \frac{2X_k^2(3X_k^2+5)}{(1+X_k^2)^2}$; Q – заданная производительность.

2. Считаем, что безразмерная координата сечения выхода X_K изменяется от зоны загрузки до зоны выгрузки по линейному закону (рис. 8.1).

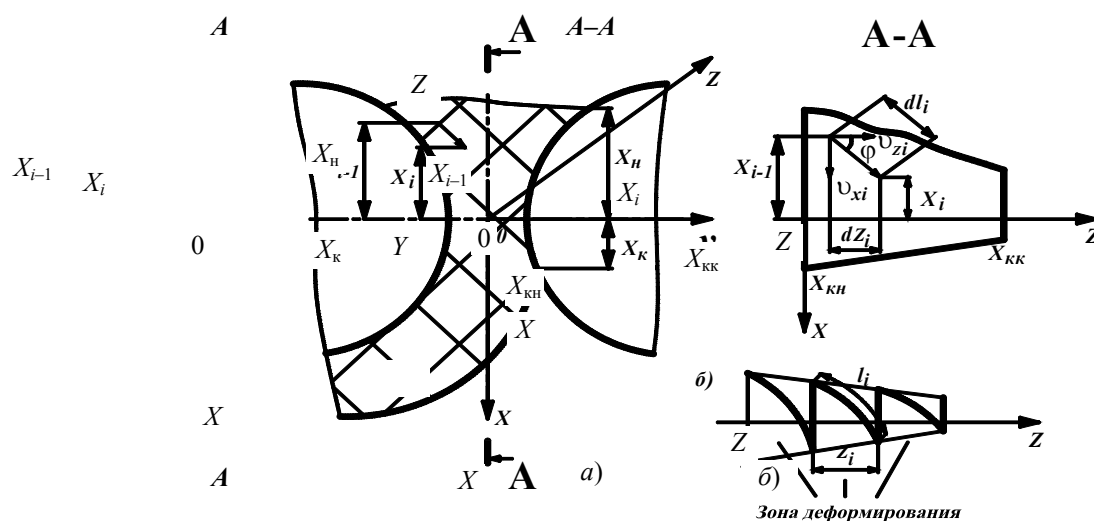


Рис. 8.1. К расчету γ_c :

a – допущения; *б* – циклограмма движения материала с учетом деформации

8.2. ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРАНУЛЯТА ОТ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ И НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВАЛЬЦОВ

После расчета величины сдвига вдоль оси X по формулам (8.1) – (8.4) (периодический процесс) и расчета суммарной величины сдвига γ_c по формулам (8.5) – (8.8) (непрерывный процесс) (программа 10, прил. К) в зависимости от технологических и конструктивных параметров процесса были проведены эксперименты и получены графические зависимости физико-механических свойств гранулята σ_p от величины сдвига, показанные на рис. 8.2.

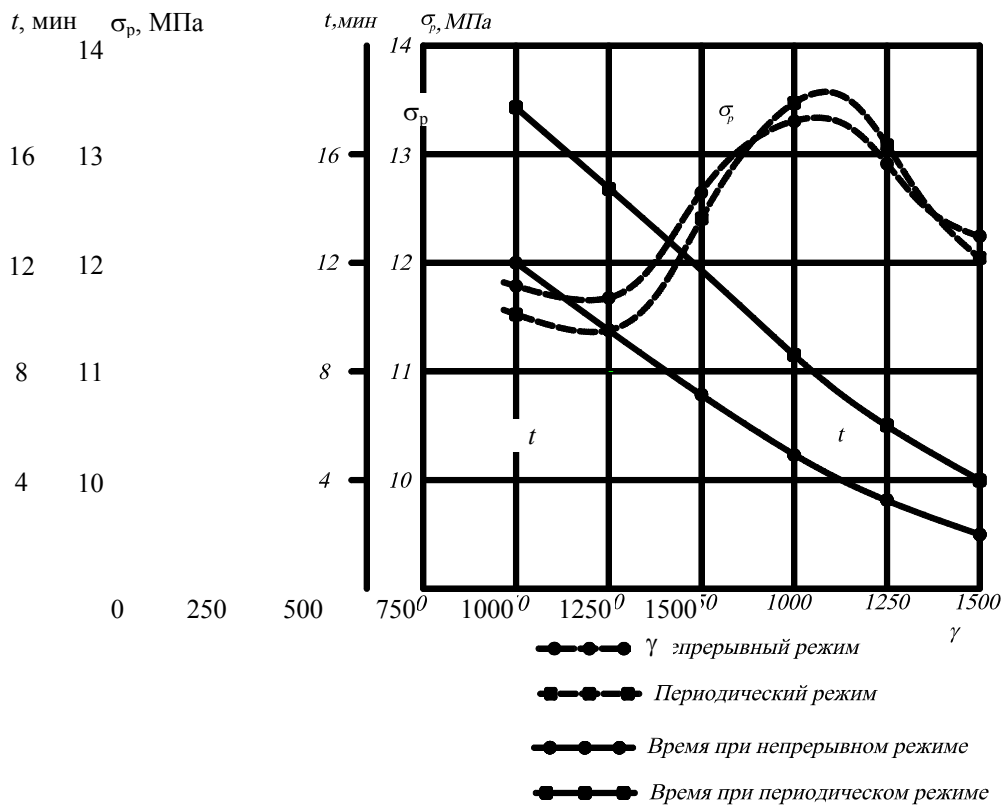


Рис. 8.2. Зависимость предела прочности σ_p от величины сдвига γ при периодическом и непрерывном режиме работы валцов

Анализ рис. 8.2 позволяет сделать вывод, что лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания в 2,1 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается в 2,1 раза.

Для проверки адекватности расчета суммарной величины сдвига были проведены эксперименты на вальцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной валка 500 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости физико-механических свойств гранулята σ_p от величины сдвига γ_c , показанные на рис. 8.3 в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке.

Из анализа рис. 8.3 можно сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели гранулята наблюдаются при такой же величине сдвига γ_c , как при опытах на ЭУ. Расхождение между физико-механическими показателями составляет не более 7 %.

σ_p , МПа

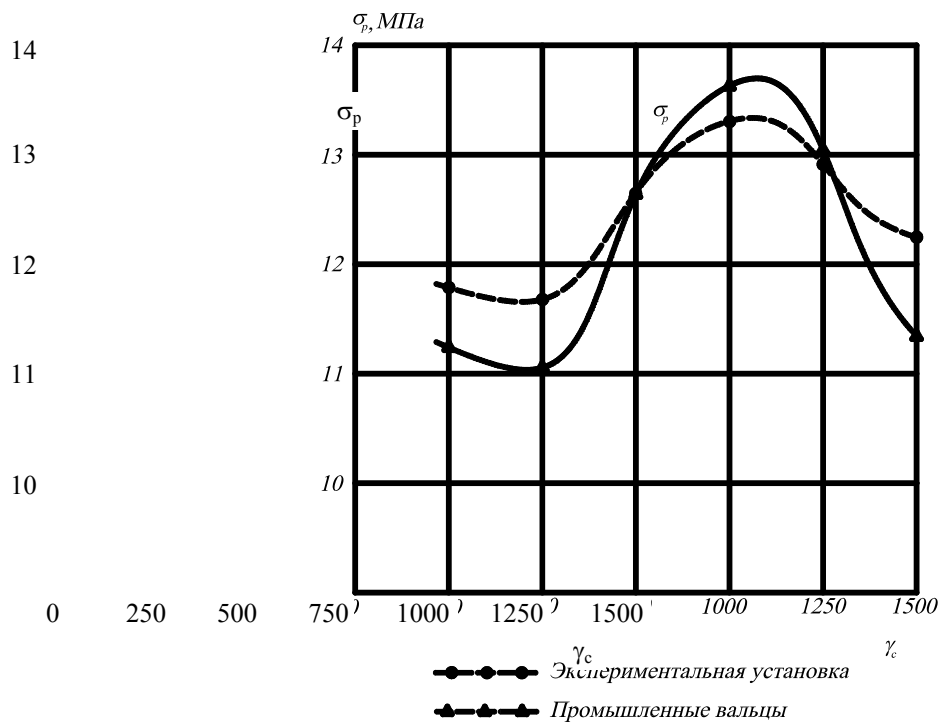


Рис. 8.3. Зависимости предела прочности σ_p от величины сдвига γ_c , полученные на ЭУ и на промышленных вальцах

9. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

В качестве исходных параметров, необходимых для расчета, принимаются:

- 1) реологические константы перерабатываемого материала K и n ;
- 2) продолжительность вальцевания – t ;
- 3) удельная мощность, реализуемая в процессе механической обработки материала на вальцах – P (программа 9, прил. Ж).

При расчете основных параметров непрерывного процесса вальцевания могут встретиться два варианта задач:

- 1) при заданных геометрических размерах валков вальцов, скоростях вращения и фрикции необходимо определить производительность;
- 2) при заданной производительности необходимо определить основные геометрические размеры валков (диаметр и длину).

9.1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПЕРВОМУ ВАРИАНТУ

Для расчета параметров процесса и оборудования по первому варианту задач дополнительно должны быть заданы: скорость вращения переднего валка, величина фрикции и геометрические размеры валков (радиус и длина рабочей части).

Расчет ведем в следующей последовательности:

- 1) Находим оптимальную высоту "запаса" материала на валках $X_{\text{ин}}$ с помощью программы 9 (прил. Ж) по методике, изложенной в разделе 7.2.
- 2) Оптимальную величину минимального зазора между валками – h_0 находим по методике, изло-

женной в [91].

По формулам (7.9), (7.10) для различных значений R/h_{02} вычисляем величину максимального значения функции F_0^{\max} .

По полученным значениям функции F_0^{\max} строим график зависимости F_0^{\max} от величины минимального зазора между валками h_0 (кривая 1, рис. 9.1).

Далее по уравнению (3.8) для заданного по условию значения величины удельной мощности P находим величину функции $F_0^p(X_k, n, R/h_{02})$ для различных значений величины зазора и строим график зависимости ее от h_0 (кривая 2, рис. 9.1). Точка пересечения графиков

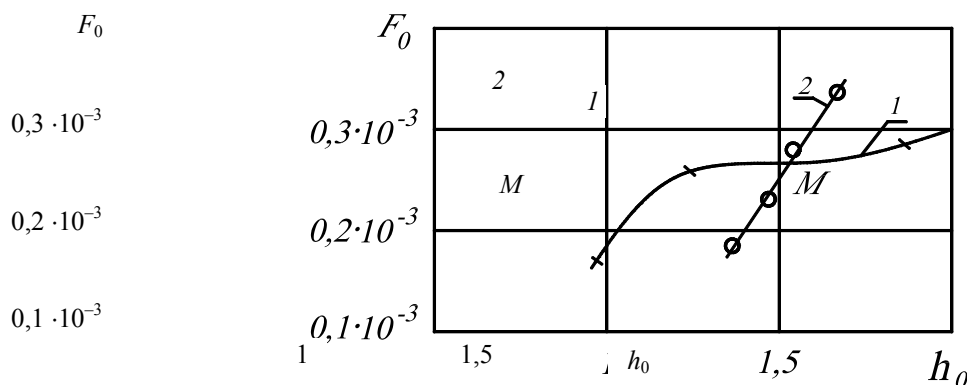


Рис. 9.1. Зависимость функции F_0 от величины минимального зазора между валками h_0 :
 $1 - F_0^{\max}$; $2 - F_0^p$

функций F_0^{\max} и F_0^p (точка M) определяет оптимальную величину минимального зазора между валками h_0 для заданного значения удельной мощности.

3) Определяем производительность вальцов, при непрерывном режиме работы Q по методике, изложенной в [90, 91].

Значение величины безразмерного комплекса Q^*Z определяется из выражения [91]:

$$Q^*Z = \frac{2Qz}{U_1 h_{02}^2 R}. \quad (9.1)$$

В то же время производительность вальцов непрерывного действия можно выразить как отношение объема материала на валках V к продолжительности вальцевания t . Тогда значение комплекса Q^*Z определится как [91]:

$$Q^*Z = \frac{2V_b}{U_1 h_{02}^2 R t}. \quad (9.2)$$

Величина объема материала на валках определяется по уравнению [91]:

$$V = \frac{R h_{02}^3 U_1 \sqrt{2R h_{02}}}{Q} \varphi_1 \left(X_k \frac{R}{h_{02}} \right), \quad (9.3)$$

где

$$\begin{aligned}
\varphi_1 = \int_{X_{к0}}^{X_{кк}} & \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1 - X_k^2) \left[\frac{R}{h_{02}} + (1 + X_k^2) \right] - (1 + X_k^2) (X_k + X_H) + \right. \\
& + \left. \left[X_H + X_k + \frac{1}{3} (X_H^4 + X_k^4) \right] \right\} \times \left[\frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1 + X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + \right. \\
& + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,144X_H^7) + \\
& + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\
& - 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\
& - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2 (3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\
& \left. + 1,4X_k \ln(1 + X_k^2) - 1,4X_H \ln(1 + X_H^2) \right] dx.
\end{aligned} \tag{9.4}$$

Совместное решение (9.1) и (9.2) позволяет определить производительность вальцов при непрерывном режиме их работы по формуле [90, 91]:

$$Q = \sqrt{\frac{Rh_{02}^3 U_1 (2Rh_{02})^{\frac{1}{2}}}{t}} \varphi_1. \tag{9.5}$$

Вследствие некоторой сложности вычисления функции φ_1 расчет производительности представляет определенные трудности. Как показано в работе [90] величину объема материала на валках вальцов, работающих по непрерывному режиму, можно вычислить по уравнению

$$\begin{aligned}
V = 2h_{02} \sqrt{2Rh_{02}} \upsilon \times \\
\times \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1 + X_k^2) - (1 + X_k^2) (X_k + X_H) + \left[X_H + X_k + \frac{1}{3} (X_H^3 + X_k^3) \right] \right\},
\end{aligned} \tag{9.6}$$

где υ – скорость течения материала, м/с.

Тогда производительность вальцов непрерывного действия может быть определена из выражения [90, 91]:

$$Q = \frac{2h_{02} \sqrt{2Rh_{02}} \upsilon k(R/h_{02}, X_k, X_H)}{t}, \tag{9.7}$$

где

$$k = \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1 + X_k^2) \left[\frac{R}{h_{02}} + (1 + X_k^2) (X_k + X_H) + \left[X_H + X_k + \frac{1}{3} (X_H^3 + X_k^3) \right] \right]. \tag{9.8}$$

4) Геометрические размеры каналов отборочно-гранулирующего устройства определяем по методике, изложенной в разделе 2.3.

5) Определяем суммарную величину сдвига по формулам (4.1 – 4.5) (программа 10, прил. Е). Если полученная суммарная величина сдвига отличается от суммарной величины сдвига, обеспечивающей

наилучшие показатели перерабатываемого материала по качеству, то вносим корректировку, изменяя h_0 , частоту вращения переднего вала u , величину фрикции f , время вальцевания t , с целью изменения суммарной величины сдвига, приближаясь к наилучшим показателям по качеству для конкретного вальцуемого полимера.

б) Находим силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания (распорное усилие F_n и технологическую мощность N_n , а также мощность привода вальцов N_0) по методике, изложенной в [90, 91].

Величина распорного усилия F_n определяется по формуле

$$F_n = \frac{\mu U_1 R^2 h_{02}^2 (1+f) \left(\frac{U}{h_{02}}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n}{2Q} f_1(X_k, n), \quad (9.9)$$

где

$$f_1(X_k, n) = \int_{X_{k0}}^0 \int_{X_k}^{X_H} \int_{X_k}^X \frac{(\pm X^2 \pm X_k^2)^n}{(1+X^2)^{2n+1}} \times \\ \times \left[\frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1+X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H + X_H^3 - 0,6X_H^5 + \right. \\ \left. + 0,143X_H^7) + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \right. \\ \left. - X_k^3(3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2(3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \right. \\ \left. + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dXdX_k. \quad (9.10)$$

Значение технологической мощности N_n , необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала, определяется по формуле

$$N_n = \frac{\mu U_1^2 R h_{02}^2 \sqrt{2R h_{02}} \left(\frac{U_1}{h_{02}}\right)^n \left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \left(\frac{f+1}{2}\right)}{Q} f_2(X_k, n), \quad (9.11)$$

где

$$f_2(X_k, n) = \int_{X_{k0}}^0 \int_{X_k}^{X_H} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)}{(1+X^2)^{2n}} \left[\frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1+X_k^2)^2} \times \right. \\ \times (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_H - X_H^3 - 0,6X_H^5 - 0,143X_H^7) + \\ + 6X_k \arctg X_H (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ - 6X_k \arctg X_k (X_H + X_H^3 + 0,6X_H^5 + 0,143X_H^7) - \\ - X_k^3(3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) + X_k X_H^2(3,4 + 3,34X_H^2 + 0,86X_H^4) + \\ \left. + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_H \ln(1+X_H^2) \right] dXdX_k. \quad (9.12)$$

Мощность привода вальцов N_d определяется по формуле

$$N_{\text{д}} = \frac{N_n}{\eta_{\text{пр}}}, \text{ кВт}, \quad (9.13)$$

где $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода машины.

7) Проводим прочностной расчет основных деталей и узлов машины (валков, станины, механизма регулировки зазора и др.) по общепринятой методике.

8) Проводим тепловой расчет процесса непрерывного вальцевания с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов.

9.2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ВТОРОМУ ВАРИАНТУ ЗАДАЧ

Первоначально определяем объем единовременной загрузки материала на вальцы q_1 по методике, изложенной в [91].

Объем единовременной загрузки материала на вальцы q_1 определяем по формуле

$$q_1 = \frac{G_n t}{60\rho\alpha}, \text{ дм}^3, \quad (9.14)$$

где G_n – заданная производительность, кг/ч; ρ – плотность смеси, кг/м³; t – время вальцевания, мин; $\alpha = (0,8 \dots 0,9)$ – коэффициент использования машинного времени.

Далее определяем длину L и диаметр валка D , дм с учетом соотношения $L \sim 3D$ по формуле $q_1 = (0,0065 \dots 0,0085)DL$, дм³. Полученные значения L и D уточняем по ГОСТ 14333–73.

После этого находим оптимальную высоту "запаса" материала на валках $X_{\text{нн}}$; оптимальную величину минимального зазора между валками h_0 ; производительность вальцов, при непрерывном режиме работы Q ; геометрические размеры каналов отборочно-гранулирующего устройства; суммарную величину сдвига; силовые и энергетические параметры непрерывного процесса вальцевания. Проводим прочностной расчет основных деталей и узлов валкового оборудования и тепловой расчет процесса непрерывного вальцевания по методике первого варианта расчета основных параметров процесса и оборудования.

Составляем техническую характеристику спроектированной валковой установки.

10. СПОСОБЫ И КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ВАЛЬЦЕВАНИЯ И КАЛАНДРОВАНИЯ

Усовершенствование конструкции валковых машин, устройств и приспособлений для интенсификации процесса вальцевания и каландрования полимерных материалов ведется по пути увеличения производительности машин, улучшения качества получаемого продукта, а также исключения физического труда вальцовщика. Результатом этих исследований и разработок является создание валковых машин непрерывного действия и автоматизированного производства по переработке полимерных материалов.

Известно, что основными недостатками валковых машин с точки зрения увеличения интенсивности деформирования полимерной композиции, а, следовательно, производительности и качества получаемого продукта являются:

1. Наличие замкнутых линий тока в зоне деформации, что ухудшает процесс диспергирования и смешения компонентов, а соответственно удлиняет цикл обработки смеси.

2. Отсутствие перемещения вальцуемого материала вдоль образующей валка уменьшает величину сдвиговых деформаций не позволяет разорвать замкнутые линии тока смешиваемых компонентов.

3. Образующийся вращающийся "запас" в зоне деформации значительно ухудшает массообмен вальцеуемого или каландруемого полимера.

4. Малая длина зоны деформации в межвалковом зазоре приводит к значительному увеличению времени технологического процесса вальцевания и каландрования.

Применение переменной фрикции, подрезки вальцуемой смеси с возвратом ее в зону деформации для достижения переориентации поверхностей смешиваемых компонентов и выравнивания концентраций по всему объему лишь незначительно устраняет вышеперечисленные недостатки. Поэтому в современных конструкциях вальцов и каландров используют разнообразные устройства для интенсификации процесса вальцевания и каландрования:

1. Устройства для подрезки вальцуемой композиции и возврата ее в зону деформации.
2. Клиновые устройства для гомогенизации и дегазации полимерных материалов.
3. Создание конструкций валковых машин непрерывного действия автоматизированных линий по изготовлению смесей полимеров и эластомеров.
4. Устройства для увеличения зоны деформации валковых машин.

К первой группе относятся: механические ножи для подрезания вальцуемой смеси, дисковые и плуговые перемешивающие устройства, а также приспособления с закручивающими зажимами и подрезными ножами [104].

Типовая конструкция ножей показана на рис. 10.1.

Каждый из четырех ножей может смещаться вдоль штанги 1 и укрепляться на ней с помощью винта 3. Нож 8 подвижно надет на ось 7, укрепленную в держателе 6. Держатель же подвижно вставлен в обойму 4 и подпружинен в ней. Положение обоймы 4 относительно валка 9 регулируется винтом 1. Прижим ножа к валку может осуществляться не только пружиной 5, но и пневмоцилиндром. Для облегчения разрезания ножи иногда оснащают электрообогревом.

На питательно-подогревающих вальцах, с которых резиновая смесь снимается непрерывно в виде узкой ленты, устанавливается нож подобной конструкции.

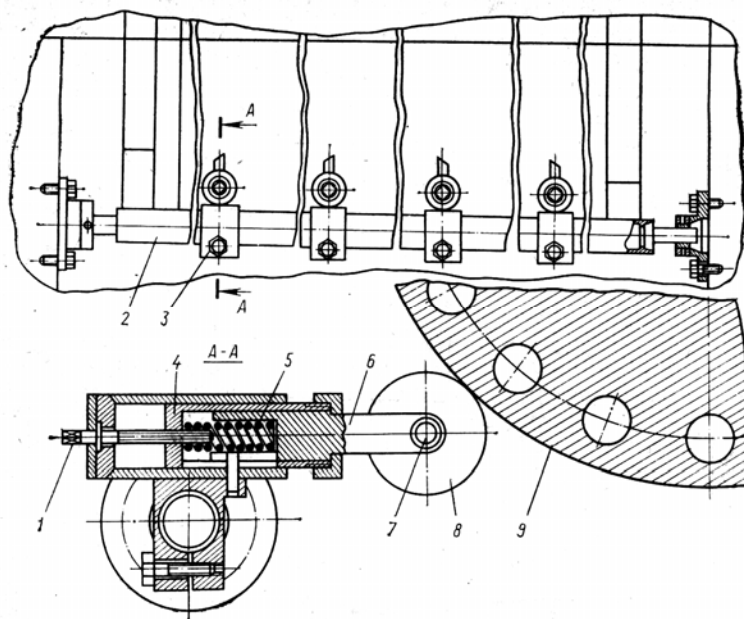


Рис. 10.1. Типовая конструкция ножей каландра:

1, 3 – винты; 2 – штанга; 4 – обойма; 5 – пружина; 6 – держатель;
7 – ось; 8 – нож; 9 – валок

Для интенсификации смешения на вальцах используют различные приемы. Об одном из них – подрезании с поворотом слоя упоминалось ранее. Механический нож для выполнения этой операции установлен на суппорте, который с помощью ходового винта может перемещаться вдоль валка. Прижим ножа к валку и отвод от него осуществляется пневмоцилиндром двойного действия, также укрепленным на суппорте.

Недостатками этой группы устройств являются: частые поломки дисковых ножей при соприкосновении их с рабочей поверхностью вала, малая степень гомогенизации вальцуемого объема полимера, сложность конструктивного оформления плужков и устройств с закручивающимися зажимами, потери мощности привода на трение, трудоемкость их переустановки при переходе на новый шифр смеси [104].

Интересное решение данной проблемы показано в работах кафедры "Переработка полимеров и упаковочное производство" Тамбовского государственного технического университета [105 – 107].

На рис. 10.2 представлено устройство экструзионного типа, разработанное на кафедре "Переработка полимеров и упаковочное производство" Тамбовского государственного технического университета.

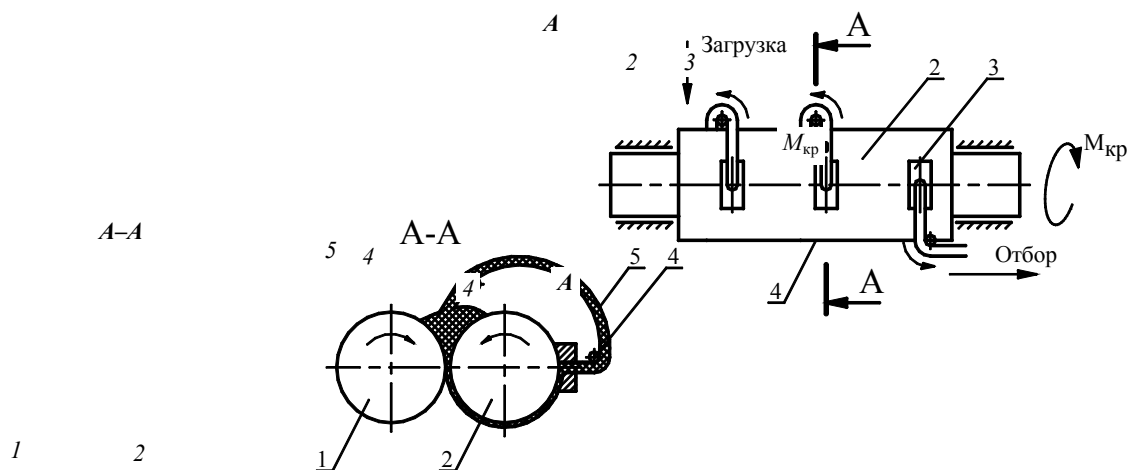


Рис. 10.2. Устройство для интенсификации процесса вальцевания полимеров:

1, 2 – валки вальцов; 3 – экструзионная приставка;
4 – направляющие ролики; 5 – жгут (лента) вальцуемого материала

Устройство для отбора и возврата в зону деформации вальцуемой смеси представляет собой экструзионную приставку 3 с формующим каналом круглого или прямоугольного сечения. Количество приставок может быть от одного до четырех и зависит от свойств вальцуемого материала и размеров рабочей поверхности вала. Экспериментальные исследования показали работоспособность приспособления, повышение производительности валковой машины до 20 % и исключение физического труда вальцовщика.

Вальцы для непрерывной обработки полимерных материалов, содержащие два вала, смонтированное на траверсе отборочное приспособление и средство для возврата материала в межвалковый зазор показаны на рис. 10.3. С целью повышения производительности средство для возврата материала в межвалковый зазор выполнено в виде закрепленных на отборочном приспособлении гибких лент, охватывающих валки в зоне отбора материала и соединенных с траверсой посредством пружин.

На рис. 10.3 показано крепление устройства на вальцах.

Вальцы содержат отборочное приспособление 1, установленное на нижней траверсе 2 с помощью кронштейнов 3. Нижняя траверса 2 посредством вертикальных тяг 4 крепится к верхней траверсе 5. Высота установки нижней траверсы регулируется с помощью гайки 6. Верхняя траверса устанавливается на направляющих 7 круглого сечения, которые с помощью специальных кронштейнов крепятся к ограничительным стрелам (не показаны). Вальцы содержат также средство для возврата материала в межвалковый зазор, выполненное в виде закрепленных на отборочном приспособлении 1 гибких лент 8, например стальных, охватывающих валки 9 в зоне отбора материала на угол 150° и соединенных с верхней траверсой 5 посредством пружин 10. Валки могут быть выполнены как гладкими, так и рифлеными. Вальцы работают следующим образом.

Через систему привода валки 9 вращаются навстречу друг другу. При непрерывном вальцевании материал загружается в зазор вблизи от одной из ограничительных стрел и при обработке перемещается

вдоль образующих валков 9. Отборочное приспособление устанавливается у противоположной ограничительной стрелы. Материал через канал круглого или прямоугольного сечения отборочного приспособления 1 выводится непрерывно в виде жгута или ленты из зоны вальцевания. Часть материала остается в пазах рифлений валков 9 и возвращается в зону вальцевания с помощью охватывающих гибких лент 8.

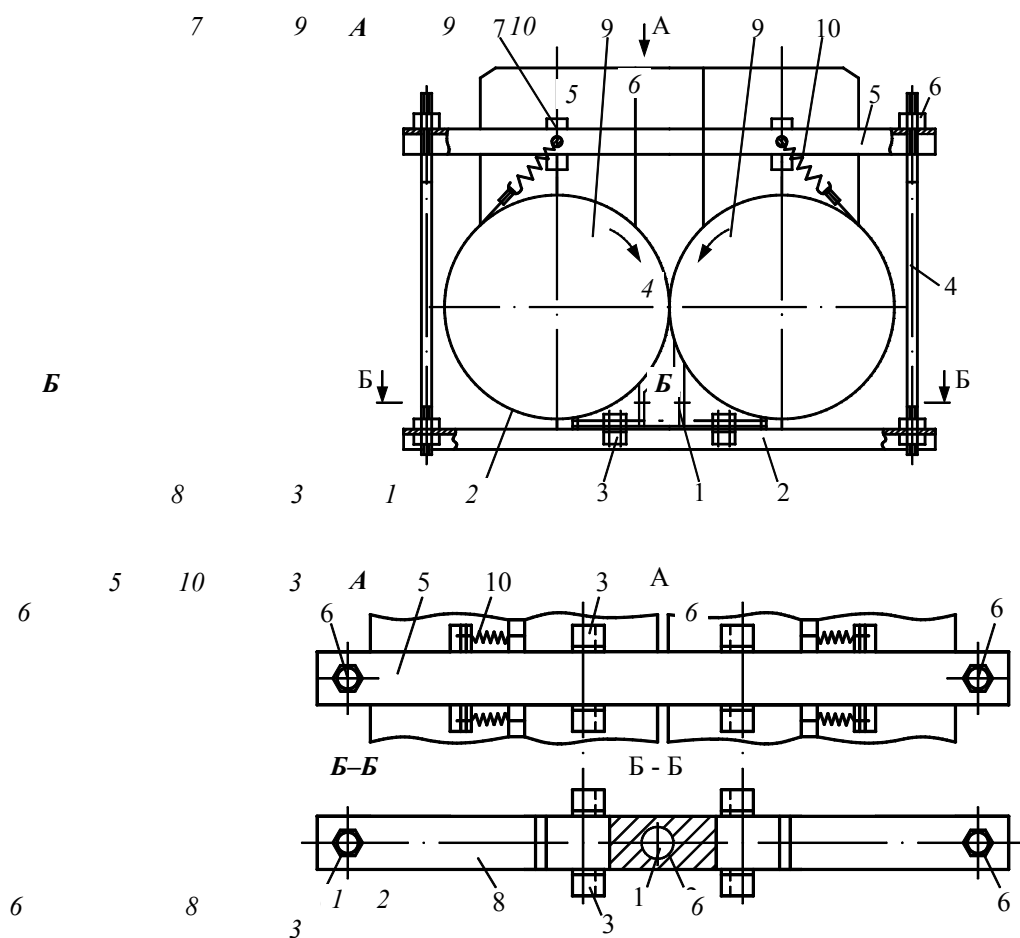


Рис. 10.3. Конструкция устройства для отбора и возврата вальцуемого материала в зону деформации:

1 – экструзионное приспособление; 2 – нижняя траверса; 3 – кронштейны;
4 – тяги; 5 – верхняя траверса; 6 – гайка; 7 – направляющая;
8 – гибкие ленты; 9 – валки

Устройство позволяет не только производить непрерывно отбор вальцуемого материала, но и исключить просыпание материала на поддон валцов и исключить физический труд рабочего-вальцовщика.

Другое решение проблемы интенсификации процесса вальцевания полимерной композиции показано на рис. 10.4.

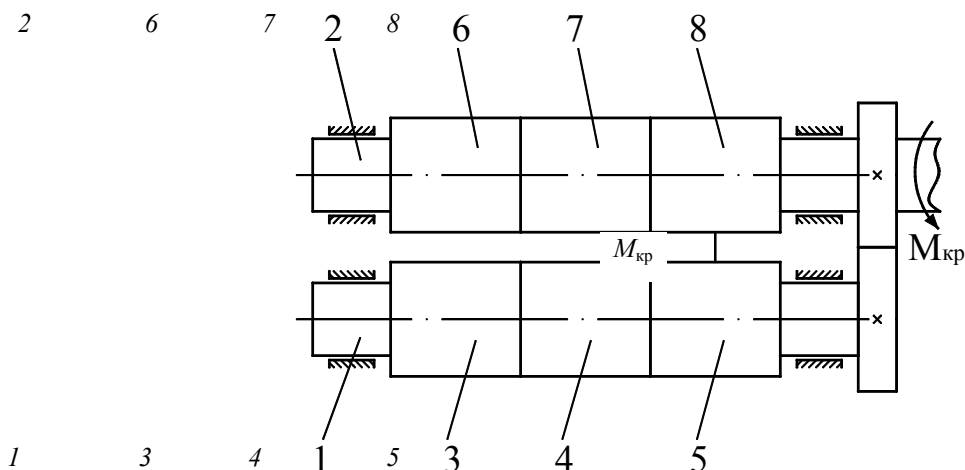


Рис. 10.4. Вальцы для обработки полимерного материала:

1, 2 – валки; 3 – 8 – кольцевые участки

Вальцы для непрерывной обработки полимерных материалов, содержащие передний и задний валки, отличаются от традиционных тем, что с целью интенсификации процесса смешения и диспергирования поверхности валков выполнены в виде чередующихся и равных по длине кольцевых участков с гладкой и шероховатой поверхностями. Причем против участков с гладкой поверхностью одного валка расположены участки с шероховатой поверхностью другого валка.

Вследствие разной чистоты поверхности валков вальцуемый материал перетекает с одного участка переднего валка на другой заднего, тем самым разрываются замкнутые линии тока с обновлением поверхности вальцуемых компонентов. Количество чередующихся участков зависит от размеров рабочей поверхности валков и свойств вальцуемого материала. Такая конструкция позволяет исключить ручную подрезку смеси, исключить физический труд рабочего и сократить время смешения от 20 до 50 % в сравнении с традиционными методами вальцевания.

Отдельную группу устройств представляют дополнительные валки различной компоновки [108]. Разработанные приспособления позволяют интенсивно охлаждать вальцуемую композицию, повысить производительность валкового оборудования. В качестве недостатка таких устройств следует отметить снижение эффективности смешения компонентов и применение физического труда рабочего-вальцовщика.

К третьей группе устройств для интенсификации процесса вальцевания и каландрования относятся клиновые устройства, вводимые в область деформации. При этом между поверхностью валка и клином образуется сужающийся зазор. Виды клиновых устройств показаны на рис. 10.5

Течение между клином и валком при этом может быть (рис. 10.6) либо с циркуляционной зоной (а), либо без нее (б). При высоких скоростях сдвига происходит отделение материала от клина (в) и переход к турбулентному потоку (г).

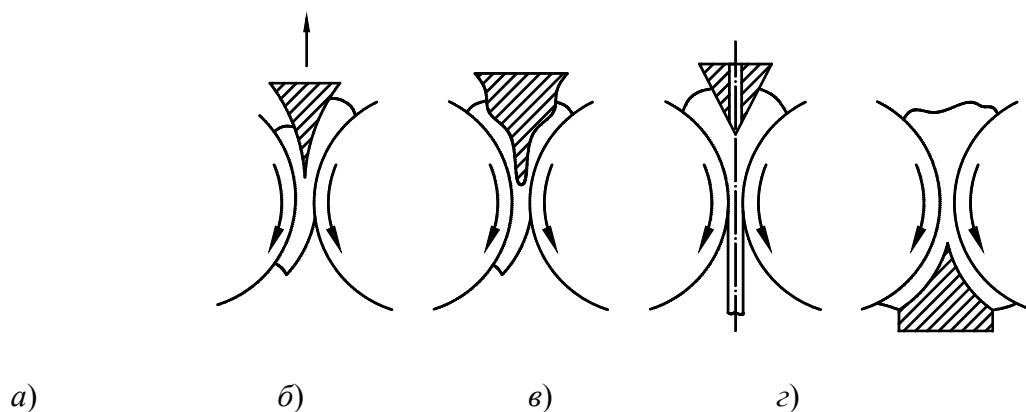


Рис.10.5. Виды клиновых приспособлений:

a – односторонний клин с плавным контуром рабочей поверхности;
б – двухсторонний волнообразный; *в* – для обкладки армирующих основ;
г – для повышения противодействия

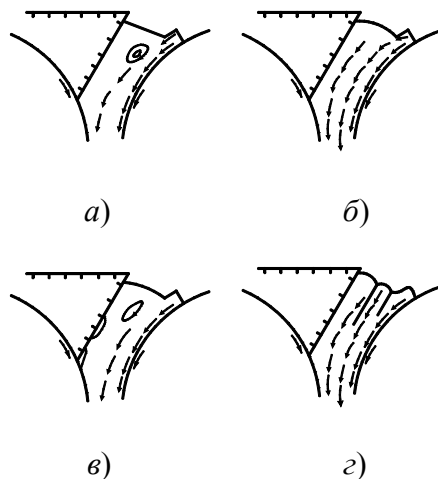


Рис. 10.6. Схемы течения материала в клиновом зазоре

Двухсторонний клин используют для получения двухслойных пленок или пластин или при обкладке текстильного или металлического корда.

На рис. 10.7 показано клиновое устройство к валковой машине для переработки полимерных материалов, содержащее смонтированный на станине и расположенный вдоль межвалкового зазора клин с закрепленной одним концом на его рабочей поверхности планкой и со смонтированным в его вершине роликом, связанным с приводом вращения. С целью повышения эффективности работы устройство снабжено дополнительной планкой, закрепленной одним концом на другой рабочей поверхности клина, ролик выполнен в виде цилиндра с эллиптическим поперечным сечением, а свободные концы планок установлены охватывающими ролик с диаметрально противоположных сторон.

Использование ролика позволяет дополнительно интенсифицировать процесс каландрования и вальцевания полимерных материалов и получить более качественную продукцию с большей производительностью.

Конструктивное решение для интенсификации процесса смешения полимерных материалов показано на рис. 10.8.

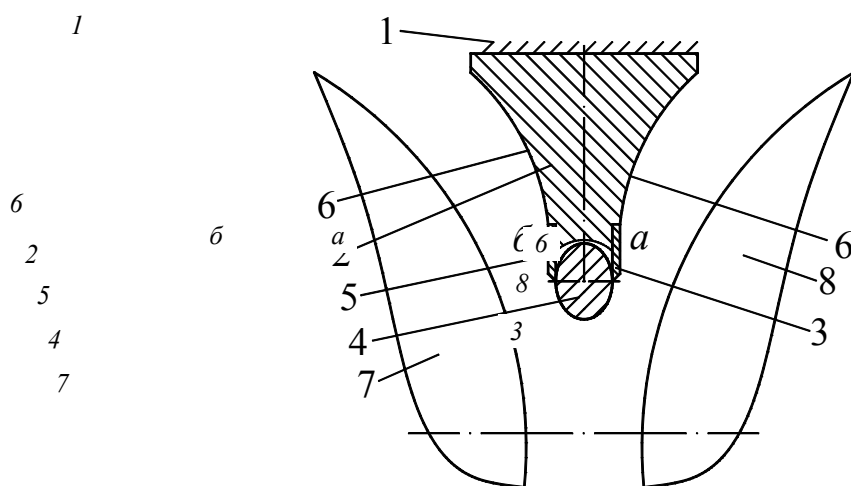


Рис. 10.7. Клиновое устройство к валковым машинам для переработки полимерных материалов
1 – станина; *2* – клин; *3, 5* – планки; *4* – ролик;
6 – рабочие поверхности клина; *7, 8* – валки

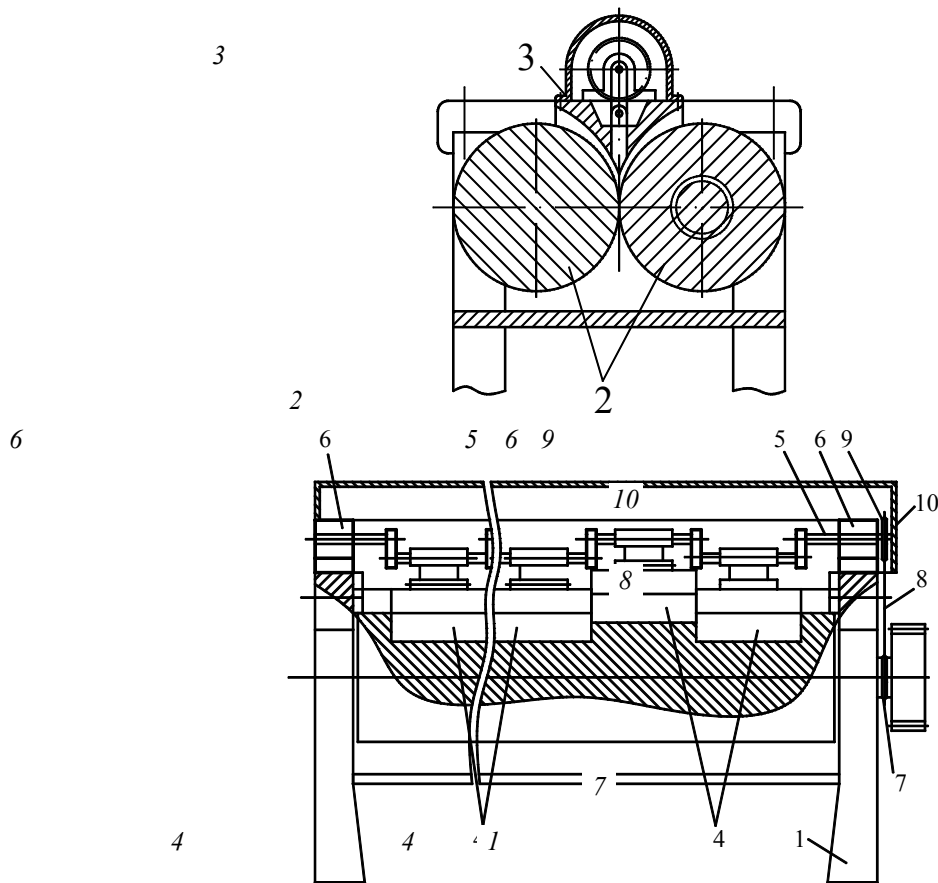


Рис. 10.8. Приспособление к вальцам для интенсификации процесса перемешивания полимерных материалов:

1 – станина; *2* – валки; *3* – секционный клин отражатель;
4 – перемещающиеся секции; *5* – коленчатый вал; *6* – подшипник,
7, 9 – звездочка; *8* – цепная передача; *10* – кожух

Оно содержит смонтированные на станине вальцы и расположенный вдоль зазора между последними секционный клин-отражатель с перемешивающими секциями, закрепленными на опоре и имеющими соответствующий конфигурации зазора между валками профиль поперечного сечения. С целью предотвращения застойных зон в перерабатываемом материале, опора выполнена в виде коленчатого вала, снабженного приводом его вращения. Секция совершает возвратно-поступательные движения, внедряясь в запас полимера на разную глубину и разрывая замкнутые линии тока частиц полимеров.

Конструкция позволяет регулировать глубину погружения клина во вращающийся запас вальцуемого полимера и осуществлять подогрев или охлаждение вальцуемого полимера. Такое устройство позволяет вести процесс смешения, подогрева, модификации и пластикации с высокой производительностью и получить за минимальное время заданное качество продукта.

Следует отметить, что использование клиновых устройств позволяет достигнуть значительного преимущества в сравнении с традиционными способами вальцевания и каландрования:

1. Увеличить зону деформации и повысить смесительный эффект.
2. Устранить влияние неравномерной подачи полимера в зазор каландра и вальцов непрерывного действия.
3. Существенно повысить рабочие скорости вращения валков без ухудшения качества получаемых изделий.
4. Улучшить теплоотвод через клиновое устройство избытка тепловой энергии, что позволяет поддерживать заданную температуру переработки и исключить деструкцию вальцуемого или каландруемого материала.

5. Устранить влияние неравномерности подачи полимера в рабочий зазор машины, что улучшает калибр выпускаемого листа или пленки.

Односторонний клин может выполнять функцию валка каландра. Одновалковый каландр с тремя клиновыми устройствами, выполняющий функции четырехвалкового каландра, показан на рис. 10.9.

Подобная конструкция была разработана Роденакером (пат. 1629728 ФРГ). Установка состоит из одного валка, сопряженного с устройством, состоящим из большого числа клиновых элементов. Создание такой установки позволит значительно сэкономить конструкционные материалы, производственные площади, снизить энергозатраты.

В третью группу следует отнести автоматизированные вальцы непрерывного действия разных модификаций, листовально-смесительные агрегаты [104]. Особенностью листовально-смесительных агрегатов является комбинация двух типов машин (роторных смесителей и вальцов), скомпонованных в один агрегат. Однако сложность, громоздкость конструкции, большая металлоемкость, трудоемкость обслуживания ограничивают их применение в промышленности РТИ, производстве автомобильных шин и изделий из пластмасс.

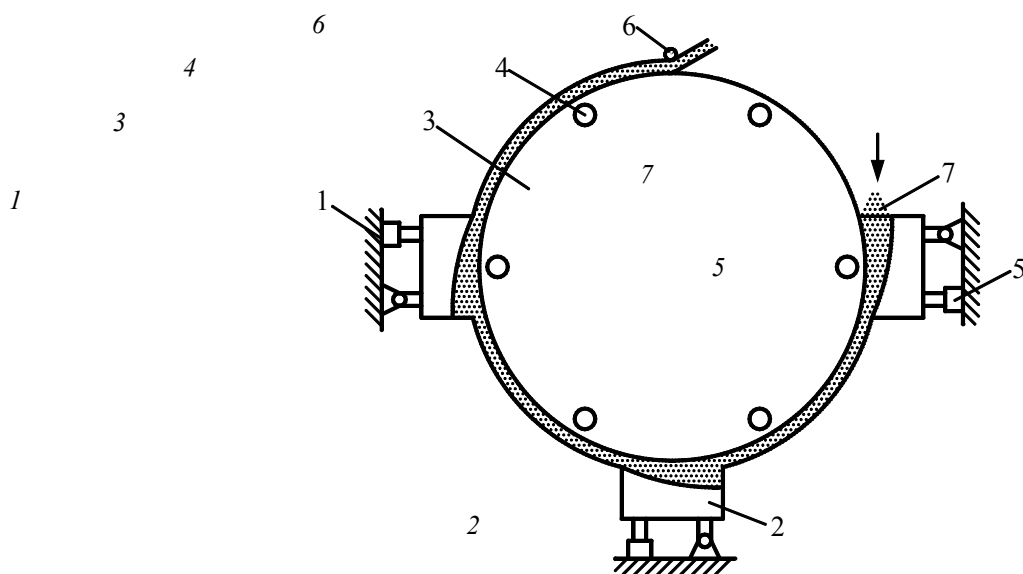


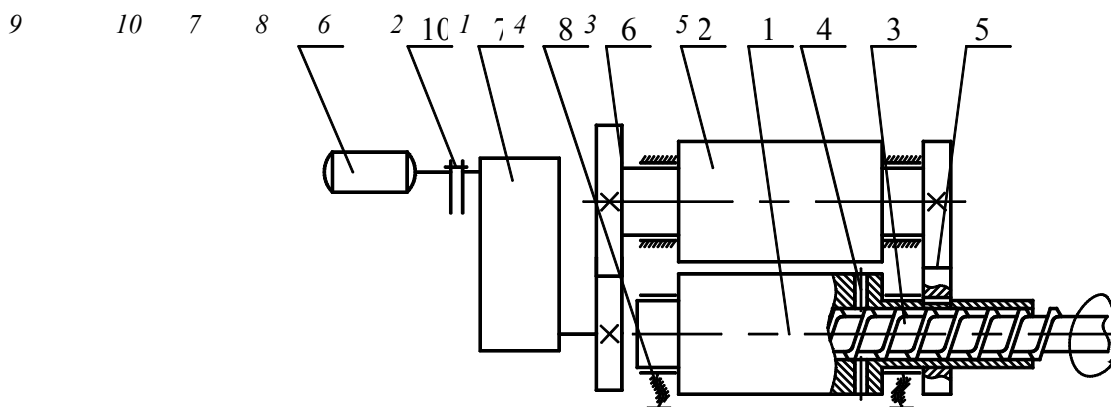
Рис. 10.9. Схема одновалкового каландра:

1 – опорное устройство; 2 – клин; 3 – валок; 4 – каналы для нагрева валка;
5 – регулировочное устройство; 6 – отводящий ролик;
7 – гранулированный материал

На кафедре полимерного машиностроения Тамбовского технического университета произведен комплекс работ по разработке конструкции вальцов непрерывного действия и на их базе автоматизированных процессов производства высоковязких полимерных композиций. На рис. 10.10 показана кинематическая схема валкового пластикатора-гранулятора непрерывного действия. (ВПГ) [111].

Он включает в себя передний гранулирующий валок 1, который имеет фильеры 4, задний гладкий валок 2, гранулирующий червяк 3, сменные фрикционные шестерни 5, приводные шестерни 6, редуктор 7, механизм регулировки зазора 8, муфту 10, привод ВПГ осуществляется от двигателя постоянного тока 9.

Работа ВПГ осуществляется следующим образом. От двигателя 9, через муфту 10, редуктор 7, приводные шестерни 6, крутящий момент передается на задний валок 2, с заднего валка через фрикционные шестерни 5 крутящий момент передается на передний гранулирующий валок 1, необходимый рабочий зазор устанавливается при помощи механизма регулировки зазора 8. Исходный материал подается в межвалковый зазор у левого края валка, захватывается валками и заполняет всю рабочую поверхность гранулирующего валка 1, после образования



**Рис. 10.10. Кинематическая схема валкового
пластикатора-гранулятора**

вращающегося запаса материал под действием давления, развиваемого в межвалковом зазоре, продавливается через фильеры 4, внутрь валка 1, где срезается гребнем гранулирующего червяка 3, захватывается им и перемещается в сторону выгрузного отверстия. Гранулирующий червяк может быть закреплен неподвижно или иметь собственный привод, позволяющий плавно регулировать частоту его вращения. На рисунке привод червяка показан условно. В случае неподвижного закрепления червяка имеет значение направление его нарезки.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить влияние основных технологических параметров процесса (скорости вращения валков, фрикции, величины зазора, температуры переработки, реологических свойств эластомера, величины вращающегося запаса перерабатываемого материала в межвалковом зазоре, времени пребывания в зоне деформации) на величину пластичности, размеры гранул, производительность установки и энергосиловые параметры процесса. Экспериментально определено оптимальное время вальцевания каучуков и резиновых смесей в зависимости от технологических параметров процесса (температуры растворителя и эластомера, величины гранул и скорости вращения червяка).

Представляет интерес конструкция валцов непрерывного действия для переработки пленочных отходов термопластов, как промышленных, так и бытовых с одновременным гранулированием материала. Работа такой установки описана в главе 6, рис. 6.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козулин Н.А., Михалев М.Ф.** Определение мощности валцов при пластификации каучуков // Химическое машиностроение. 1959. № 1. С. 26 – 28.
2. **Машиностроение:** Энциклопедия. В 40 т. Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. IV-12. Машины и аппараты химических и нефтеперерабатывающих производств. М.: Машиностроение, 2004. 829 с.
3. **Карпачев П.С. и др.** Машины и аппараты производств заменителей кожи и пленочных материалов. М.: Легкая индустрия, 1964.
4. **Тарг С.Н.** Основные задачи теории ламинарных течений. М.: ГИТТЛ, 1951.
5. **Торнер Р.В., Добролюбов Г.В.** Приближенная гидродинамическая теория механизма вальцевания // Каучук и резина. 1958. № 4.
6. **Бекин Н.Г.** Валковые машины для переработки резиновых смесей (основы теории). Ярославль: ЯТИ, 1969.
7. **Лукач Ю.Е., Рябинин Д.Д., Метлов Б.Н.** Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1967.

8. **Мак-Келви Д.М.** Переработка полимеров. М.: Химия, 1965.
9. **Торнер Р.В.** Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). М.: Химия, 1977.
10. **Рябинин Д.Д., Лукач С.Е.** Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1972.
11. **Бекин Н.Г., Шанин Н.П.** Оборудование заводов резиновой промышленности. Л.: Химия, 1969.
12. **Перегудов В.В.** Тепловые процессы и установки технологии полимерных строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1973.
13. **Завгородний В.К. и др.** Оборудование предприятий по переработке пластмасс. Л.: Химия, 1972.
14. **Бернхардт Э.** Переработка термопластичных материалов. М.: Госхимиздат, 1962.
15. **Балашов М.М., Клинков А.С.** Исследование непрерывного процесса вальцевания полимеров // Пластмассы и каучук. 1973. Т. 20, № 4. С. 291 – 293.
16. **Клинков А.С.** Исследование непрерывного процесса вальцевания полимерных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1972.
17. **Лукач Ю.Е., Воронин Л.Г., Ружинская Л.И. и др.** Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров. Киев: Тэхника, 1988. 208 с.
18. **Писаренко Г.С., Яковлев А.Б., Матвеев В.В.** Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.
19. **Клинков А.С., Маликов О.Г., Кочетов В.И. и др.** Основы проектирования и расчета литьевого и прессового оборудования для переработки полимерных материалов. Тамбов, 1999. 165 с.
20. **Анурьев В.И.** Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1, 2. 728 с.
21. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1974. 559 с.
22. **Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А.** Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. М.: Химия, 1986. 487 с.
23. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 480 с.
24. **Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610142 от 05.01.2004.** Расчет оптимальных конструктивных параметров станин вальцов с учетом минимизации массы конструкции (Оптимизация станин вальцов) / М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев, О.В. Ефремов.
25. **Пономарева В.Т., Лихачева Н.Н., Ткачик З.А.** Использование пластмассовых отходов за рубежом // Пластические массы. 2002. № 5. С. 44 – 48.
26. **Hinterwaldner R. et al.** Coating. 1995. V. 28, № 10. S. 364, 366 – 367, 370.
27. **Nießner N.** Kunststoffe. 1998. V. 88, № 6. S. 874 – 876, 878 – 880.
28. **Скапелле А.** Kunststoffe. 1995. V. 85, № 10. S. 1636, 1638 – 1640.
29. **Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика: Учеб. пособие / Г.К. Лобачев, В.Ф. Желтобрюхов и др.** Волгоград, 1999. 180 с.
30. **Одесс В.И.** Вторичные ресурсы: хозяйственный механизм использования. М., 1988. 15 с.
31. **Андрейцев Д.Ф., Артемьева Т.Е., Вильниц С.А.** Технические и экономические проблемы вторичной переработки и использования полимерных материалов. М., 1972. 83 с.
32. **Вторичное использование полимерных материалов / Под ред. Е.Г. Любешкиной.** М., 1985. 192 с.
33. **Hunkeler D. et al.** Polym. News. 1998. V. 23, № 3. S. 93 – 94.
34. **Petrotekku.** Petrotech. 1997. V. 20, № 8. S. 651 – 656.
35. **Mod. Plast. Int.** 1996. V. 26, № 3. S. 86.
36. **Wang Jing. et al.** Huanjing kexue. Chin. J Environ. 1998. V. 19, № 5. S. 52 – 54.
37. **Lefevre C. et al.** Chim nouv. 1998. V. 16, № 62. S. 1921 – 1922.
38. **Tailleur J.-P.** Usine nouv. 1998. Hors serie no V., S. 76 – 77.
39. **Schlicht R.** Kunststoffe. 1998. V. 88, № 6. S. 888 – 890.

40. **Bruce G.** Chem. Week. V. 159, № 15. S. 32.
41. **Мономеры** для поликонденсации / Под ред. Д. Стилла. М., 1976. 253 с.
42. **Фомин В.А., Гузеев В.В.** Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования // Пластические массы. 2001. № 2. С. 42 – 47.
43. **Васнев В.А.** Биоразлагаемые полимеры // Высокомолекул. соед., сер. Б. 1997. Т. 39, № 12. С. 2073 – 2086.
44. **Rasch R.** Chem.-Ing.-Techn. 1976. Jg. 48, № 1. S. 82 – 84.
45. **Аристархов Д.В., Журавский Г.И. и др.** Технологии переработки отходов растительной биомассы, технической резины и пластмассы // Инженерно-физический журнал. 2001. № 6. С. 152 – 156.
46. **Rasch R.** Chem.-Ztg. 1974. B. 98, № 5. S. 253 – 260.
47. **Кастнер Х., Камински В.** Повторная переработка пластиков в исходное сырье // Нефтегазовые технологии. 1995. № 6. С. 42 – 44.
48. **Штарке Л.** Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс: Пер. с нем. / Под ред. В.А. Брагинского. Л., 1987. 176 с.
49. **Бобович Б.Б.** Утилизация отходов полимеров: Учеб. пособие. М., 1998. 62 с.
50. **Мингалеев М.С., Левин В.С., Черников В.В., Ковалева Р.И.** Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., 1979. Вып. 1. С. 40 – 44.
51. **Акутин М.С., Забара М.Я., Жукова И.Г., Шишкова М.А.** Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., 1977. Вып. 6. С. 28 – 34.
52. **Забара М.Я.** Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., 1978. Вып. 10. С. 26 – 31.
53. **Забара М.Я., Кондратьева В.В. и др.** Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., 1975. Вып. 1. С. 54 – 58.
54. **Улановский М.Л., Левин В.С. и др.** Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., 1982. Вып. 3. С. 7 – 9.
55. **Коротышев Е.В.** Исследование процесса смещения полимеров на валковых машинах: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1974.
56. **Шляпинтох В.Я.** Фотохимические превращения и стабилизация полимеров. М., 1979. 344 с.
57. **Рэнгби Б., Рабек Я.** Фотодеструкция, фотоокисление и фотостабилизация полимеров. М., 1978. 676 с.
58. **Chew C.H., Gan M., Scott G.** Eur. Polym. Sci. 1978. V. 14, S. 361 – 364.
59. **Kresta J., Majer J.** J. Appl. Polym. Sci. 1969. V. 13. S. 1859 – 1871.
60. **Sadramohaghegh G., Scott G.** Polym. J. 1980. V. 16, № 11. S. 1037 – 1042.
61. **Pabiot J., Verdu J.** Polym. Eng. and Sci. 1981. V. 21, № 1. S. 32 – 38.
62. **Забара М.Я., Чекарева Л.Б.** Пластические массы. 1978. № 5. С. 29 – 30.
63. **Fihamer L.T.** Muanyagis gumi. 1977. № 12. S. 351 – 354.
64. **Дуденков С.В., Калашникова С.А., Генин Н.Н. и др.** Повышение эффективности заготовки, обработки, переработки и использования вторичных полимерных материалов. Обзорная информ. М., 1979. Вып. 9. 52 с.
65. **Cernansky A., Siroky R.** Plasty a kauč. 1976. V.13, № 12. S. 360 – 364.
66. **Овчинникова Г.П., Артеменко С.Е.** Рециклинг вторичных полимеров: Учеб. пособие. Саратов, 2000. 21 с.
67. **Вильниц С.А., Вапна Ю.М.** Химия и технология высокомолекулярных соединений. М., 1980. Т. 15. С. 127 – 160.
68. **Гуль В.Е.** Структура и прочность полимеров. М., 1978. 328 с.
69. **Kunststoffe.** 1976. B. 66, № 6. S. 342 – 351; № 8. S. 480 – 487.
70. **Mod. Plast. Int.** 1975. V. 5, № 5. S. 22 – 24.
71. **Чурсина Т.В., Лебедева Е.Д., Осипчик В.С.** Использование технологических отходов полиэтилена для получения концентрата технического углерода // Пластические массы. 1996. № 3. С. 29 – 30.

72. **Любешкина Е.Г., Фридман М.Л., Березкин В.И., Гуль В.Е.** Пластические массы. 1982. № 1. С. 19 – 20.
73. **Дмитриева Н.Р., Волков Т.И., Михалева Н.М. и др.** Композиционные материалы на основе наполненного вторичного полиэтилена // Пластические массы. 1993. № 6. С. 36 – 39.
74. **Раскин Е.Б., Владимиров С.В. и др.** Технология изготовления торцевого паркета из вторичного термопласта и отходов древесины // Пластические массы. 1998. № 2. С. 44 – 46.
75. **Лебедева Т.М., Шалацкая С.А.** Переработка вторичного поливинилхлоридного сырья. Л., 1991. 21 с.
76. **Гржималовская Л.В., Мурогита Л.И.** Переработка отходов при производстве изделий из пластизоля ПВХ. Л., 1988. С. 26 – 29.
77. **Wiessenkämper W.** Kunststoff – Textilabfälle als Sekundärrohstoff. Kunststoffen. 1978. В. 68, № 5. S. 299 – 302.
78. **Вольфсон С.А., Никольский В.Г.** Твердофазное деформационное разрушение и измельчение полимерных материалов // Порошковые технологии. Высокомол. соед. Сер. Б. 1994. Т. 36, № 6. С. 1040 – 1056.
79. **Ахметханов Р.М., Кадыров Р.Г., Минскер К.С.** Вторичная переработка отходов поливинилхлорида с использованием метода упруго-деформационного диспергирования // Пластические массы. 2002. № 4. С. 45 – 47.
80. **Фридман М.Л.** Специфика реологических свойств и переработки вторичных полимерных материалов // Пути повышения эффективности использования вторичных полимерных ресурсов: Тез. докл. I Всесоюзн. конф. М., 1985. Ч. 1. С. 73.
81. **Кравченко Б.В., Рувинская И.Н.** Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., 1978. Вып. 4. С. 28 – 31.
82. **Артеменко С.Е., Овчинникова Г.П., Кононенко С.Г. и др.** Использование технологических отходов АБС-пластика в автомобилестроении // Пластические массы. 1995. № 3. С. 44 – 45.
83. **Бух Н.Н., Овчинникова Г.П., Артеменко С.Е., Ишанов Б.Р.** Увеличение ресурса эксплуатации вторичного ПКА путем его модифицирования // Пластические массы. 1997. № 1. С. 37 – 39.
84. **Юрханов В.Б., Воробьева Г.С. и др.** Конструкционный материал на основе вторичных полиэтилена и полиэтилентерефталата // Пластические массы. 1998. № 4. С. 40 – 42.
85. **Кузнецов С.В.** Вторичные пластики: переработка отходов ПЭТФ бутылок // Пластические массы. 2001. № 9. С. 3 – 8.
86. **Биндер Роберт Ф.** Вторичная переработка ПЭТФ // Пластические массы. 2003. № 1. С. 3 – 4.
87. **Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е.** Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1965. 362 с.
88. **Балашов М.М., Левин А.Н.** Исследование течения блочного полистирола «Д» и разработка конструкции реометра // Пластические массы. 1961. № 1. С. 23 – 30.
89. **Торнер Р.В.** Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). М.: Химия, 1977. 464 с.
90. **Клинок А.С., Павлов Н.В.** Расчет и конструирование машин для переработки полимерных материалов. Валковые машины и роторные смесители: Учеб. пособие. М.: Изд-во Московского ин-та хим. машиностроения, 1977. 50 с.
91. **Проектирование** и расчет валковых машин для полимерных материалов: Учеб. пособие / А.С. Клинок, В.И. Кочетов, М.В. Соколов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 128 с.
92. **Разработка** технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов / А.С. Клинок, М.В. Соколов, И.В. Шашков, М.П. Беляев // Природные ресурсы и учение В.И. Вернадского – основа устойчивого развития цивилизации: Тез. докл. межрегион. науч.-техн. конф. Тамбов, 2003. С. 194 – 195.

93. **Технология** получения полимерпесчанной черепицы из отходов термопластов / С.П. Хрущев, И.В. Шашков, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Полимеры в строительстве: Тез. докл. Казань, 2004. С. 110.
94. **Клинков А.С., Соколов М.В., Шашков И.В.** Разработка технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов // IX науч. конф. ТГТУ: Тез. докл. Тамбов, 2004. С. 80.
95. **Вторичная** переработка полимерных материалов на вальцах / И.В. Шашков, А.С. Клинков, М.В. Соколов, Д.Л. Полушкин // Полимеры в строительстве: Тез. докл. Казань, 2004. С. 111.
96. **Полушкин Д.Л., Шашков И.В., Воропаев А.Г.** Разработка конструкции и метода расчета гранулирующей приставки к вальцам непрерывного действия // Инновации в мире российской науки XXI века: Сб. ст. магистрантов. Тамбов, 2005. Вып. II. С. 54 – 56.
97. **Минимизация** технологической мощности вальцов при переработке отходов пластмасс / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов // V Междунар. теплофизическая школа: Тез. докл. Тамбов, 2004. Ч. 2. С. 276 – 277.
98. **Современное** состояние в области утилизации пленочных полимерных материалов / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов // X науч. конф. ТГТУ: Тез. докл. Тамбов, 2005. С. 55 – 56.
99. **Полушкин Д.Л., Шашков И.В., Соколов М.В.** Определение режимов утилизации пленочных полимерных материалов на вальцах // Сб. ст. магистрантов по материалам науч. конф. 15 – 17 февраля 2005 г. Тамбов, 2005. Вып. I. Ч. 1. С. 107 – 110.
100. **Полушкин Д.Л., Шашков И.В.** Влияние технологических параметров процесса вальцевания на физико-механические показатели ПЭНП // Инновации в мире российской науки XXI века: Сб. ст. магистрантов. Тамбов, 2005. Вып. II. С. 57 – 60.
101. **Утилизация** упаковки из пленочных полимерных материалов на валковых машинах непрерывного действия / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов // Новые технологии получения и переработки полимеров: Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2005. С. 59 – 62.
102. **Моделирование** непрерывного процесса вальцевания отходов полимерных материалов / И.В. Шашков, А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов, Д.Л. Полушкин // Авиакосмические технологии "АКТ-2004": Труды V Российской науч.-техн. конф. Воронеж, 2004. С. 166 – 172.
103. **Расчет** параметра качества гранулята при утилизации отходов термопластов на вальцах непрерывного действия / И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов // Наука на рубеже тысячелетий: Сб. докл. второй Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, 2005. С. 130 – 132.
104. **Богданов В.В., Торнер Р.В., Красовский В.Н., Регер Э.И.** Смещение полимеров. Л.: Химия; Ленинградское отделение, 1979. 192 с.
105. **А. с. 1256973 СССР.** Вальцы для непрерывной промывки эластомеров / Н.В. Павлов, А.С. Клинков. Опубл. 15.09.1986. Бюл. № 34.
106. **А. с. 956276 СССР.** Вальцы для непрерывной обработки полимерных материалов / А.С. Клинков, О.Г. Маликов, Н.В. Павлов, В.Н. Береснев. Опубл. 07.09.1982. Бюл. № 33.
107. **Шашков И.В.** Валковое оборудование и технология процесса непрерывной переработки отходов пленочных термопластов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тамбов, 2005. С. 16.
108. **Оборудование** резиновой промышленности за рубежом. М.: ЦИНТИ по автоматизации и машиностроению, 1962.
109. **А. с. 522061 СССР.** Приспособление к вальцам для интенсификации процесса перемешивания полимерных материалов / И.М. Гирсов, В.В. Богданов, Р.Г. Мирзоев, В.И. Красовский, Ю.А. Красильников. Опубл. 25.07.1976. Бюл. № 27.
110. **А. с. 1622142 СССР.** Клиновое устройство к валковой машине для переработки полимерных материалов / С.А. Рошупкин, Ю.Е. Лукач, И.О. Микуленов, ИЛ. Турнянский, И.М. Рухляева, Л.Р. Зейгермвхер. Опубл. 23.01.1991. Бюл. № 3.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Описание работы алгоритма расчета распорных усилий, действующих на валки в зависимости от частоты вращения валка

Блок 1. Начало.

Блок 2. Вводятся исходные данные: температура валков $T_{в1}$ и $T_{в2}$, скорость тихоходного валка U_T , фрикция f , реологические свойства полимеров k_T , β , T_0 , n , минимальная ширина межвалкового зазора $2H_0$, радиус валка R_v , длина рабочей части валков L , шаг по оси p , координата выхода полимера λ .

Блок 3. Открывается цикл по величине U_T от U_T до U_{Tmax} с шагом $U_T h$.

Блок 4. Переменной p задается значение координаты выхода полимера из межвалкового зазора.

Блок 5. Рассчитываются коэффициенты перед интегралами.

Блок 6. По данному значению координаты ρ рассчитывается значение подынтегральной функции в выражении для тихоходного вала:

$$\varphi_1(\rho) = \frac{\left| \left(\frac{1+2n}{n} \right) (1+f)(\rho^2 - \lambda^2) - (f-1)(1+\rho^2) \right|^{n-1} (\rho^2 - \lambda^2)}{(1+\rho^2)^{2n+1}}.$$

Блок 7. Рассчитываются значения интегралов для текущего значения ρ .

Блок 8. Выполняется сравнение: если интеграл в выражении для давления отрицательный, то выполняется блок 9, а иначе – блок 10.

Блок 9. Рассчитывается следующее значение переменной ρ .

Блок 10. Определяется распорное усилие, действующее на тихоходный валок.

Блок 11. Рассчитывается значение подынтегральной функции в выражении для быстроходного вала:

$$\varphi_2(\rho) = \frac{\left| \left(\frac{1+2n}{n} \right) (1+f)(\rho^2 - \lambda^2) + (f-1)(1+\rho^2) \right|^{n-1} (\rho^2 - \lambda^2)}{(1+\rho^2)^{2n+1}}.$$

Блок 12. Для текущего значения ρ определяются значения интегралов из выражений $S_p = \sum_{i=1}^n \varphi(\rho) \Delta\rho$;

$$S_F = \sum_{i=1}^n S_p \Delta\rho.$$

Блок 13. Выполняется сравнение: если интеграл в выражении для давления, действующего на быстроходный валок, отрицательный, то выполняется блок 14, а если положительный – то блок 15.

Блок 14. Рассчитывается следующее значение переменной ρ .

Блок 15. Определяется распорное усилие, действующее на быстроходный валок: $F_6 = A_F S_F$.

Блок 16. Значение распорных усилий $F_T(n_T)$ и $F_6(n_T)$ выводятся на печать. Возврат на блок 3.

Блок 17. Конец.

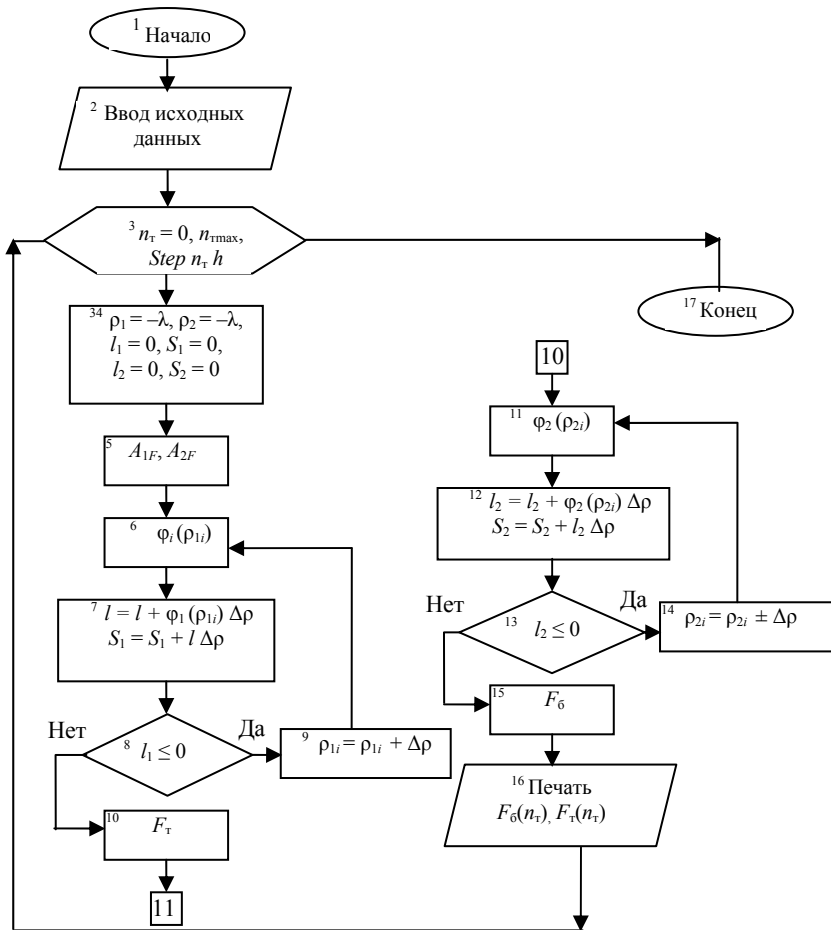


Рис. А. Блок-схема алгоритма расчета распорных усилий, действующих на валки в зависимости от частоты вращения (или температуры) валков
Идентификаторы к программам 1 и 2

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единица измерения
$T1, T2, T_{max}$	$T_{в1}$	Температура валка	$^{\circ}\text{C}$
$T2$	$T_{в2}$	Температура валка	$^{\circ}\text{C}$
$T0$	T_0	Температура	$^{\circ}\text{C}$
$K0$	K_0	Коэффициент консистентности	$\text{Па} \cdot \text{c}^n$
NR	n	Показатель степени реологического уравнения	
FR	f	Фрикция	
$F2$	F_{τ}	Распорное усилие на тихоходном валке	Н
$F4$	F_6	Распорное усилие на быстроходном валке	Н
BE	β	Температурный коэффициент	$1/^{\circ}\text{C}$

RB	R_b	Радиус валка	м
CK	U_T	Скорость тихоходного валка	м/с
H_0	H_0	Половина минимальной ширины межвалкового зазора	м
TH, RZ	ρ_n	Координата входа полимера в межвалковый зазор	
T	$\rho(t)$	Текущее значение переменной	
$ub1$	n_T	Частота вращения тихоходного валка	об/мин·с
ub	U_T	Окружная скорость тихоходного валка	м/с
SH	λ	Координата выхода полимера из межвалкового зазора	
L	L	Длина валка	м

Программа 1

РАСЧЕТ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВАЛКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛКОВ

5 CLS : SCREEN 11

11 REM "РАСЧЕТ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛКОВ"

LINE (75, 70)-(75, 295)

LINE (75, 295)-(600, 295)

FOR w = 75 TO 585 STEP 10

LINE (w, 293)-(w, 298), 6

NEXT w

FOR w1 = 75 TO 585 STEP 50

LINE (w1, 291)-(w1, 299), 6

NEXT w1

FOR Y = 295 TO 73 STEP -5

LINE (76, Y)-(73, Y), 7

NEXT Y

FOR Y1 = 295 TO 95 STEP -25

LINE (78, Y1)-(71, Y1), 7

NEXT Y1

LINE (585, 70)-(585, 295)

FOR Y2 = 295 TO 77 STEP -5

LINE (586, Y2)-(583, Y2), 7

NEXT Y2

FOR Y3 = 295 TO 95 STEP -25

LINE (588, Y3)-(581, Y3), 7

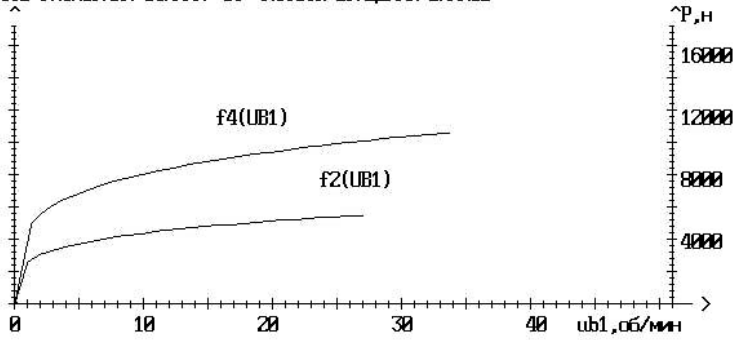
```

NEXT Y3
LOCATE 5, 75: PRINT "P,н": LOCATE 13, 75: PRINT "8000"
LOCATE 10, 75: PRINT "12000": LOCATE 13, 40: PRINT "f2(UB1)"
LOCATE 10, 30: PRINT "f4(UB1)": LOCATE 16, 75: PRINT "4000"
LOCATE 20, 10: PRINT "0": LOCATE 20, 22: PRINT "10"
LOCATE 20, 47: PRINT "30": LOCATE 20, 60: PRINT "40"
LOCATE 20, 72: PRINT "50": LOCATE 20, 34: PRINT "20 "
LOCATE 7, 75: PRINT "16000"; LOCATE 5, 74: PRINT "^"
LOCATE 19, 77: PRINT ">"
LOCATE 4, 1: PRINT "ЗАВИСИМОСТЬ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
ВАЛКОВ"
LOCATE 20, 65: PRINT "ub1,об/мин"
21 DATA 0.05,0.08,1e-3,1.25,0.23,2.7,1.16e5,60,0.3,0.5,63,63,0.485,0.3
31 READ X, R, H0, fr, N, BE, K0, T0, rt, RB, t1, t2, LA, L
uh1 = 1: um1 = 27.55: ff2 = 0: ff4 = 0
FOR ub1 = uh1 TO um1 STEP uh1
UB = ub1 * .105 * R: UB2 = ub1 * .105 * R * fr
41 ar = 2 * R * (UB / 2) ^ N * (1 + 2 * N) / N * (1 + fr) / H0 ^ N
51 r1 = -LA: r2 = -LA: s1 = 0: s2 = 0: i1 = 0: i2 = 0
61 a1 = (r1 ^ 2 - LA ^ 2) / ((1 + r1 ^ 2) ^ (1 + 2 * N))
71 f1 = a1 * ABS((1 + 2 * N) * (1 + fr) * (r1 ^ 2 - LA ^ 2) / N - (fr - 1) * (1 + r1 ^ 2)) ^ (N - 1)
81 i1 = i1 + f1 * X: s1 = s1 + i1
91 IF r1 <= rt THEN r1 = r1 + X ELSE 111
101 GOTO 61
111 f2 = L * ar * K0 * EXP(-BE * (t1 - T0) / (T0 + 273)) * s1 * X: f2 = ABS(f2): p2 = f2 / L
121 a2 = (r2 ^ 2 - LA ^ 2) / ((1 + r2 ^ 2) ^ (1 + 2 * N))
131 f3 = a2 * ABS((1 + 2 * N) / N * (1 + fr) * (r2 ^ 2 - LA ^ 2) + (fr - 1) * (1 + r2 ^ 2)) ^ (N - 1)
141 i2 = i2 + f3 * X: s2 = s2 + i2
151 IF r2 <= RB THEN r2 = r2 + X ELSE 171
161 GOTO 121
171 f4 = L * ar * K0 * EXP(-BE * (t2 - T0) / (T0 + 273)) * s2 * X: f4 = ABS(f4): p4 = f4 / L
LINE (75 + (ub1 - uh1) * 10, 295 - ff2 * .0125)-(75 + ub1 * 10, 295 - f2 * .0125), 7
LINE (75 + (ub1 - uh1) * 10 * fr, 295 - ff4 * .0125)-(75 + ub1 * 10 * fr, 295 - f4 * .0125), 7
ff2 = f2: ff4 = f4
LOCATE 23, 1: PRINT "распорное усилие, действующее на тихоходный валок при ubmax F2="; f2;
"н"
LOCATE 24, 1: PRINT "то же, удельное P2="; p2; "н"
LOCATE 25, 1: PRINT "распорное усилие, действующее на быстроходный валок при ubmax F4=";
f4; "н"
LOCATE 26, 1: PRINT "то же, удельное P4="; p4; "н"
NEXT ub1
LOCATE 28, 1: PRINT "rn="; RN; " ubmax="; UB; "м/с"; " ubmax2="; UB2; "м/с "; "ub1="; ub1 - uh1;
"об/мин "; "ub2="; (ub1 - uh1) * fr; "об/мин"; " la="; LA; "n="; N; "l="; L; "м"
LOCATE 29, 1: PRINT "t0="; T0; "град "; "be="; BE; "k0="; K0; "r="; R; "м "; "h0="; H0; "м "; "x="; X;
191 END

```

Результаты расчета программы 1

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛКОВ



распорное усилие, действующее на тихоходный валок при ub_{max} F2= 5467.817 н
 то же, удельное P2= 18226.06 н
 распорное усилие, действующее на быстроходный валок при ub_{max} F4= 10588.39 н
 то же, удельное P4= 35294.63 н

$r_1= 3.74$ $ub_{max1}= .2268$ м/с $ub_{max2}= .2835$ м/с $ub1= 27$ об/мин $ub2= 33.75$ об/мин

$la= .485$ $r= .23$ $l= .3$ м

$t\theta= 60$ град $be= 2.7$ кВ= 116000 $r= .08$ м $h\theta= .001$ м $x= .05$

Чтобы продолжить, нажмите любую клавишу

Программа 2

Расчет распорных усилий в зависимости от температуры валков

5 CLS : SCREEN 11

REM "РАСЧЕТ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАЛКОВ"

LINE (75, 70)-(75, 295)

LINE (75, 295)-(600, 295)

FOR w = 75 TO 585 STEP 5

LINE (w, 293)-(w, 298), 6

NEXT w

FOR w1 = 100 TO 585 STEP 50

LINE (w1, 291)-(w1, 299), 6

NEXT w1

FOR Y = 295 TO 95 STEP -5

LINE (76, Y)-(73, Y), 7

NEXT Y

FOR Y1 = 295 TO 95 STEP -20

LINE (78, Y1)-(71, Y1), 7

NEXT Y1

LINE (585, 70)-(585, 295)

```

FOR Y2 = 295 TO 95 STEP -5
LINE (586, Y2)-(583, Y2), 7
NEXT Y2
FOR Y3 = 295 TO 95 STEP -25
LINE (588, Y3)-(581, Y3), 7
NEXT Y3
LOCATE 5, 69: PRINT "P,кН": LOCATE 13, 75: PRINT "16"
LOCATE 10, 75: PRINT "24": LOCATE 10, 50: PRINT "F4(tb)"
LOCATE 7, 75: PRINT "32": LOCATE 14, 50: PRINT "F2(tb)"
LOCATE 16, 75: PRINT "8"
LOCATE 20, 9: PRINT "15": LOCATE 20, 12: PRINT "20"
LOCATE 20, 19: PRINT "30": LOCATE 20, 25: PRINT "40"
LOCATE 20, 32: PRINT "50": LOCATE 20, 38: PRINT "60 "
LOCATE 20, 44: PRINT "70": LOCATE 20, 50: PRINT "80 "
LOCATE 20, 56: PRINT "90": LOCATE 20, 62: PRINT "100 "
LOCATE 20, 68: PRINT "110 ": LOCATE 20, 72: PRINT "t,град"
LOCATE 19, 75: PRINT ">"
LOCATE 5, 10: PRINT "^^": LOCATE 5, 73: PRINT " ^"
LOCATE 3, 1: PRINT "ЗАВИСИМОСТЬ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАЛКОВ"
11 REM "РАСПОРНОЕ УСИЛИЕ"
21 DATA 0.05,0.08,1e-3,1.25,0.23,2.7,2.5e5,60,0.3,0.5,0.485,0.3,0.231
31 READ X, R, H0, fr, N, BE, K0, T0, rt, RB, LA, L, UB
ub1 = UB / .105 / R
th1 = 1: th2 = 10: tm1 = 100: TS1 = T0
FOR TS = T0 TO tm1 STEP th1
t1 = (TS - th2): t2 = TS
41 ar = 2 * R * (UB / 2) ^ N * (1 + 2 * N) / N * (1 + fr) / H0 ^ N
51 r1 = -LA: r2 = -LA: s1 = 0: s2 = 0: i1 = 0: i2 = 0
61 a1 = (r1 ^ 2 - LA ^ 2) / ((1 + r1 ^ 2) ^ (1 + 2 * N))
71 f1 = a1 * ABS((1 + 2 * N) * (1 + fr) * (r1 ^ 2 - LA ^ 2) / N - (fr - 1) *
(1 + r1 ^ 2)) ^ (N - 1)
81 i1 = i1 + f1 * X: s1 = s1 + i1
91 IF r1 <= rt THEN r1 = r1 + X ELSE 111
101 GOTO 61
111 f2 = L * ar * K0 * EXP(-BE * (t1 - T0) / (T0 + 273)) * s1 * X: f2 = ABS(f2): p2 = f2 / L
121 a2 = (r2 ^ 2 - LA ^ 2) / ((1 + r2 ^ 2) ^ (1 + 2 * N))
131 f3 = a2 * ABS((1 + 2 * N) / N * (1 + fr) * (r2 ^ 2 - LA ^ 2) + (fr - 1) *
(1 + r2 ^ 2)) ^ (N - 1)
141 i2 = i2 + f3 * X: s2 = s2 + i2
151 IF r2 <= RB THEN r2 = r2 + X ELSE 171
161 GOTO 121
171 f4 = L * ar * K0 * EXP(-BE * (t2 - T0) / (T0 + 273)) * s2 * X: f4 = ABS(f4): p4 = f4 / L
IF TS = T0 THEN ff2 = f2
IF TS = T0 THEN ff4 = f4
LINE ((TS1 - th2) * 5, 295 - ff2 * .0125 / 2)-((TS - th2) * 5, 295 - f2 * .0125 / 2), 7
LINE (TS1 * 5, 295 - ff4 * .0125 / 2)-(TS * 5, 295 - f4 * .0125 / 2), 7
ff2 = f2: ff4 = f4: TS1 = TS
LOCATE 22, 1: PRINT "распорное усилие, действующее на тихоходный валок при ТВmax F2="; f2; "Н
"
LOCATE 23, 1: PRINT "то же, удельное P2="; p2; "Н "
LOCATE 24, 1: PRINT "распорное усилие, действующее на быстроходный валок при ТВmax F4="; f4;
"Н "

```

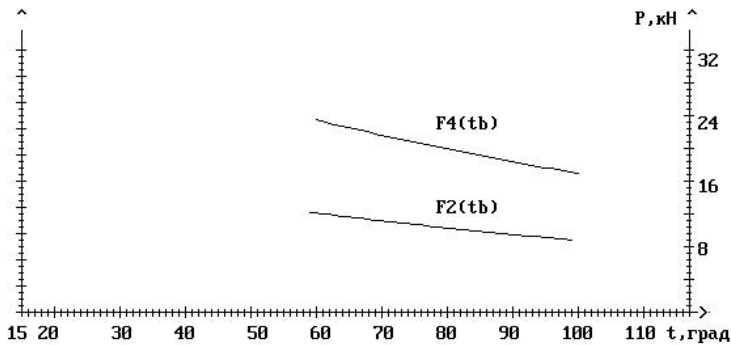
```

LOCATE 25, 1: PRINT "то же, удельное P4="; p4; "Н "
NEXT TS
LOCATE 27, 1: PRINT " u1="; UB; "м/с "; "ub1="; ub1 - uh1; "об/мин"; " u2="; (UB * fr); "м/с "; "ub2=";
(ub1 - uh1) * fr; "об/мин"
LOCATE 28, 1: PRINT "be="; BE; "k0="; K0; "r="; R; "м "; "h0="; H0; "м "; "x="; X
LOCATE 29, 1: PRINT " la="; LA; "n="; N; "L="; L; "м "; "t0="; T0; "град "; "rn="; RN
191 END

```

Результаты расчета программы 2

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПОРНЫХ УСИЛИЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАЛКОВ



распорное усилие, действующее на тихоходный валок при T_{Vmax} $F2= 8838.159$ Н
то же, удельное $P2= 29460.53$ Н
распорное усилие, действующее на быстроходный валок при T_{Vmax} $F4= 16976.82$ Н
то же, удельное $P4= 56589.41$ Н

$u1= .231$ м/с $ub1= 27.5$ об/мин $u2= .28875$ м/с $ub2= 34.375$ об/мин
 $be= 2.7$ $k0= 250000$ $r= .08$ м $h0= .001$ м $x= .05$
 $la= .485$ $n= .23$ $L= .3$ м $t0= 60$ град $rn= 0$

Чтобы продолжить, нажмите любую клавишу

Описание мощности в тихоходного валка	работы диссипации зависимости	от	алгоритма при окружной	расчета вальцевании скорости
--	-------------------------------------	----	------------------------------	------------------------------------

Блок 1. Начало.

Блок 2. Вводятся исходные данные: радиус R_v и длина L рабочей части валков, скорость тихоходного валка U_t , фрикция f , координаты входа ρ_H и выхода λ полимера из межвалкового зазора по переменной ρ ; координаты поверхностей валков по переменной $\eta = \pm 1$; коэффициент консистентности k_0 , температурный коэффициент β и температура T_0 , показатель степени реологического уравнения n , минимальная ширина межвалкового зазора $2H_0$, число отрезков разбиения по оси ρ $2n_1$ и по оси η $2n_2$ для расчета определенного интеграла.

Блок 3. Рассчитывается коэффициент при интеграле A_f , шаг по осям ρ и η , задаются начальные значения сумм S_2, S_3, z_2, z_3 .

Блок 4. Задается описание подынтегральной функции $f(\rho, \eta)$ по уравнению

$$f_Q(\rho, \eta) = \left| \frac{3(1+f)(\rho^2 - \lambda^2)}{(1+\rho^2)^2} \eta - \frac{f-1}{1+\rho^2} \right|^{n+1}.$$

Блок 5. Открывается цикл определения значений S_i .

Блок 6. Рассчитывается текущее значение ρ_i .

Блок 7. Открывается цикл расчета значений подынтегральной функции $f(\rho_i, \eta_l)$.

Блок 8. Рассчитывается текущее значение η_l .

Блок 9. По заданным значениям ρ_i и η_l определяется значение подынтегральной функции f_i .

Блоки 10 – 15. Рассчитываются значения сумм S_1, S_2, S_3 и S_i по формулам

$$S_i = S_1 + 4S_2 + 2S_3;$$

$$S_1 = f(i, 1) + f(i, 2_{n_2+1});$$

$$S_2 = f(i, 2) + f(i, 4) + \dots + f(i, 2_{n_2});$$

$$S_3 = f(i, 3) + f(i, 5) + \dots + f(i, 2_{n_2-1});$$

где $f(i, l)$ – значения подынтегральной функции в точке с координатами $\rho_i = -\lambda + i\Delta\rho$, $\eta_l = -1 + l\Delta\eta$; здесь $i = 0, 1, 2, 3, \dots, 2n_1$; $l = 0, 1, 2, 3, \dots, 2n_2$.

Блоки 16 – 21. Рассчитываются значения сумм z_1, z_2, z_3 и z по формулам:

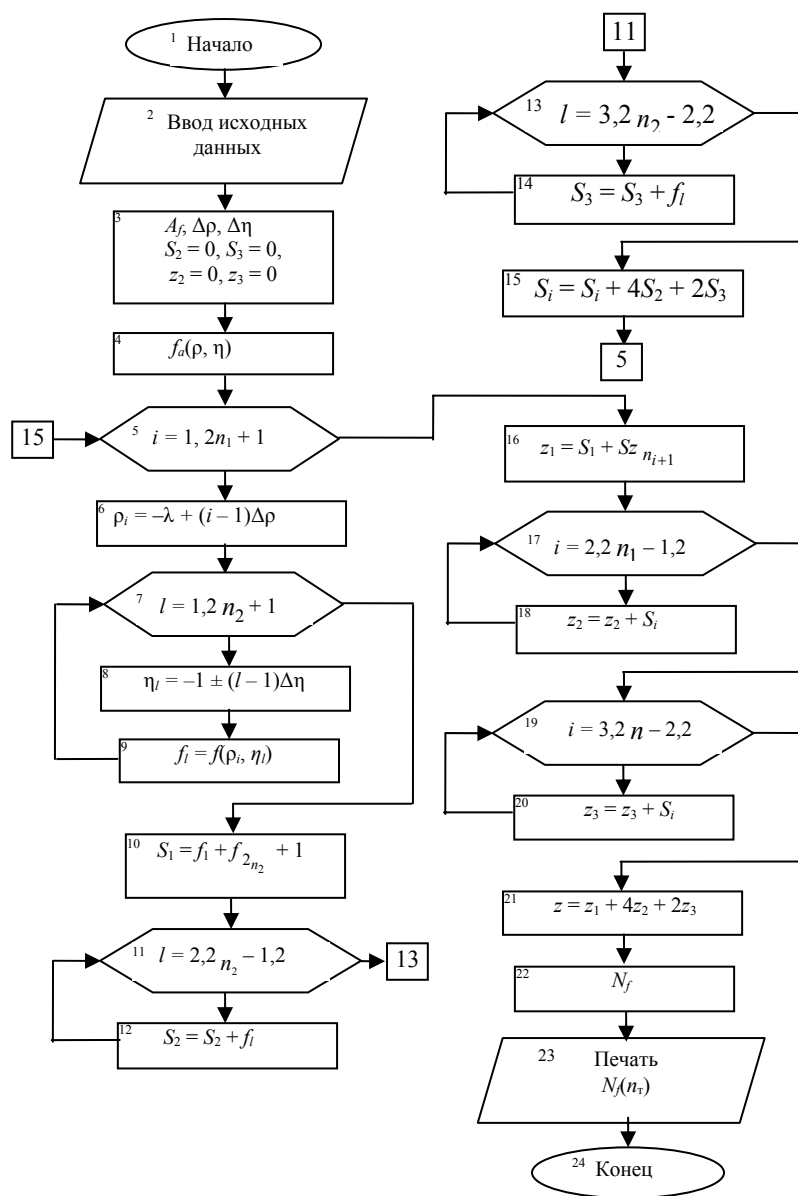


Рис. Б. Блок-схема алгоритма расчета мощности диссипации при вальцевании в зависимости от частоты вращения валков

$$z_1 = S_1 + S_{2n_1+1};$$

$$z_2 = S_2 + S_4 + \dots + S_{2n_1};$$

$$z_3 = S_3 + S_5 + \dots + S_{2n_1-1};$$

$$z = z_1 + 4z_2 + 2z_3;$$

Блок 22. Определяется значение мощности диссипации N_f по уравнению: $N_f = \frac{1}{18} \frac{(\rho_H + \lambda)}{n_1 n_2} z$.

Блок 23. Распечатывается значение N_f .

Блок 24. Конец.

Идентификаторы к программам 3 и 4.

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единица измерения
T_1, T_S, T_B	T_{B1}	Температура валка	$^{\circ}\text{C}$
T_2	T_{B2}	Температура валка	$^{\circ}\text{C}$

T_0	T_0	Температура	$^{\circ}\text{C}$
K_0	K_0	Коэффициент консистентно- сти	$\text{Па} \cdot \text{c}^n$
NR	n	Показатель сте- пени реологиче- ского уравнения	
FR	f	Фрикция	
BE	β	Температурный коэффициент	
RB	$R_{\text{в}}$	Радиус валка	м
ubl	$n_{\text{т}}$	Частота враще- ния валка	об/мин·с
ub	$U_{\text{т}}$	Окружная ско- рость тихоход- ного валка	м/с
H_0	H_0	Половина ми- нимальной ши- рины межвалко- вого зазора	м
TH, RZ	$\rho_{\text{н}}$	Координата входа полимера в межвалковый зазор	
T	$\rho(t)$	Текущее значе- ние переменной	
SH	λ	Координата вы- хода полимера из межвалково- го зазора	
L	L	Длина валка	м
N_f	M_1	Мощность дис- сипации	Вт

Программа 3

Расчет мощности диссипации при вальцевании
в зависимости от частоты вращения валков

5 CLS : SCREEN 11

REM "РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДИССИПАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
ВАЛКОВ"

LINE (75, 70)-(75, 295)

LINE (75, 295)-(600, 295)

FOR w = 75 TO 585 STEP 10

LINE (w, 293)-(w, 298), 6

NEXT w

FOR w1 = 75 TO 585 STEP 50

LINE (w1, 291)-(w1, 299), 6

NEXT w1

FOR Y = 295 TO 73 STEP -5

LINE (76, Y)-(73, Y), 7

NEXT Y

FOR Y1 = 295 TO 95 STEP -25

LINE (78, Y1)-(71, Y1), 7

```

NEXT Y1
LINE (585, 70)-(585, 295)
FOR Y2 = 295 TO 77 STEP -5
LINE (586, Y2)-(583, Y2), 7
NEXT Y2
FOR Y3 = 295 TO 95 STEP -25
LINE (588, Y3)-(581, Y3), 7
NEXT Y3
10 DATA 0.3,0.23,1e-03,0.08,1.16e5,2.7,60,63,1.25,0.485,3.74
20 READ L, N, H0, RB, K0, BE, T0, TC, fr, LA, RN
22 uh1 = 1: um1 = 27.55: MM = 0
30 E = 100: NN = 1: M = 1
54 DEF FNAA (R) = 3 * (1 + fr) * (V ^ 2 - LA ^ 2) / (1 + V ^ 2) ^ 2
55 DEF FNBB (R) = -(fr - 1) / (1 + V ^ 2)
56 DEF FNF (R, P) = ABS(FNAA(R) * P + FNBB(R)) ^ (N + 1) * (1 + R ^ 2)
LOCATE 10, 5: PRINT "6000": LOCATE 10, 49: PRINT "M(UB1)"
LOCATE 20, 10: PRINT "0": LOCATE 20, 22: PRINT "10"
LOCATE 20, 47: PRINT "30": LOCATE 20, 60: PRINT "40"
LOCATE 20, 72: PRINT "50": LOCATE 20, 34: PRINT "20 "
LOCATE 5, 3: PRINT "M,Вт": LOCATE 13, 5: PRINT "4000"
LOCATE 7, 5: PRINT "8000": LOCATE 5, 10: PRINT "^"
LOCATE 19, 77: PRINT ">"
LOCATE 4, 1: PRINT "ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ДИССИПАЦИИ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
ВАЛКОВ"
LOCATE 16, 5: PRINT "2000": LOCATE 20, 65: PRINT "ub1,об/мин"
FOR ub1 = uh1 TO um1 STEP uh1
UB = ub1 * .105 * RB: UB2 = ub1 * .105 * RB * fr
65 A = -LA: b = RN: C = -1: D = 1
70 CC = 2 * K0 * EXP(-BE * (TC - T0) / (T0 + 273)) * L * (UB / (H0)) ^ (N + 1) * H0 * SQR(2 * H0 * RB)
80 SI = 0
90 S = 0: HX = (b - A) / NN: HY = (D - C) / M: I = NN
100 X = A + I * HX: J = M
110 Y = C + J * HY
120 IF I = 0 THEN 150 ELSE 130
130 IF I = N THEN 150 ELSE 140
140 IF I - INT(I) = 0 THEN 160 ELSE 170
150 P = .5: GOTO 180
160 P = 1: GOTO 180
170 P = 2
180 IF J = 0 THEN 210 ELSE 190
190 IF J = M THEN 210 ELSE 200
200 IF J - INT(J) = 0 THEN 220 ELSE 230
210 K = .5: GOTO 240
220 K = 1: GOTO 240
230 K = 2
240 S = S + P * K * HY * FNF(X, Y) / 9: J = J - .5
250 IF J >= 0 THEN 110 ELSE 260
260 I = I - .5: IF I >= 0 THEN 100 ELSE 270
270 IF ABS(SI - S) > E THEN 280 ELSE 300
280 SI = S: NN = 2 * NN: M = 2 * M: GOTO 90
300 M1 = CC * S
LINE (75 + (ub1 - uh1) * 10 * fr, 295 - MM * .025)-(75 + ub1 * 10 * fr, 295 - M1 * .025), 7
MM = M1
NEXT ub1
LOCATE 27, 1: PRINT "мощность диссипации при ubmax M="; M1; "Вт"

```

```

LOCATE 28, 1: PRINT "rn="; RN; " ubmax="; UB; "м/с"; " ubmax2="; UB2; "м/с "; "ub1="; ub1 - uh1;
"об/мин "; "ub2="; (ub1 - uh1) * fr; "об/мин"; " la="; LA; "n="; N; "l="; L; "m"
LOCATE 29, 1: PRINT "t0="; T0; "град "; "be="; BE; "k0="; K0; "r="; R; "м "; "h0="; H0; "м "; "x="; X;
400 END

```

Результаты расчета программы 3



мощность диссипации при ubmax M= 7374.683 BT
 r1= 3.74 ubmax= .2268 м/с ubmax2= .2835 м/с ub1= 27 об/мин ub2= 33.75 об/мин
 la= .485 r= .23 l= .3 м
 t0= 60 град be= 2.7 k0= 116000 r= .08 м h0= .001 м x= .05
 Чтобы продолжить, нажмите любую клавишу

Программа 4

Расчет мощности диссипации при вальцевании
в зависимости от температуры валков

```
5 CLS : SCREEN 11
REM "РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДИССИПАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАЛКОВ"
LINE (75, 70)-(75, 295)
  LINE (75, 295)-(600, 295)
  FOR w = 75 TO 585 STEP 5
  LINE (w, 293)-(w, 298), 6
  NEXT w
  FOR w1 = 100 TO 585 STEP 50
  LINE (w1, 291)-(w1, 299), 6
  NEXT w1
  FOR Y = 295 TO 95 STEP -5
  LINE (76, Y)-(73, Y), 7
  NEXT Y
  FOR Y1 = 295 TO 95 STEP -20
  LINE (78, Y1)-(71, Y1), 7
  NEXT Y1
  LINE (585, 70)-(585, 295)
  FOR Y2 = 295 TO 95 STEP -5
  LINE (586, Y2)-(583, Y2), 7
  NEXT Y2
  FOR Y3 = 295 TO 95 STEP -25
  LINE (588, Y3)-(581, Y3), 7
  NEXT Y3
  LOCATE 17, 60: PRINT "M(tb)"
  LOCATE 20, 9: PRINT "15": LOCATE 20, 12: PRINT "20"
  LOCATE 20, 19: PRINT "30": LOCATE 20, 25: PRINT "40"
  LOCATE 20, 32: PRINT "50": LOCATE 20, 38: PRINT "60 "
  LOCATE 20, 44: PRINT "70": LOCATE 20, 50: PRINT "80 "
  LOCATE 20, 56: PRINT "90": LOCATE 20, 62: PRINT "100 "
  LOCATE 5, 4: PRINT "М,кВт": LOCATE 14, 5: PRINT "7.2"
  LOCATE 9, 5: PRINT "14.4": LOCATE 12, 5: PRINT "10.8"
  LOCATE 7, 5: PRINT "12": LOCATE 17, 5: PRINT "3.6"
  LOCATE 20, 68: PRINT "110 ": LOCATE 20, 72: PRINT "tb,град"
  LOCATE 19, 75: PRINT ">"
  LOCATE 5, 10: PRINT "^": LOCATE 5, 73: PRINT " ^"
10 DATA 0.3,0.23,0.231,1e-03,0.08,2.5e5,27,60,1.25,0.485,3.74
20 READ L, N, UB, H0, RB, K0, BE, T0, fr, LA, RN
22 MM = 0: TS1 = T0: th1 = 1: tm1 = 100: ub1 = UB / .105 / RB
30 E = 100: NN = 1: M = 1
54 DEF FNAA (R) = 3 * (1 + fr) * (V ^ 2 - LA ^ 2) / (1 + V ^ 2) ^ 2
55 DEF FNBB (R) = -(fr - 1) / (1 + V ^ 2)
56 DEF FNF (R, P) = ABS(FNAA(R) * P + FNBB(R)) ^ (N + 1) * (1 + R ^ 2)
  LOCATE 3, 1: PRINT "ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ДИССИПАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
ВАЛКОВ"
  FOR TS = T0 TO tm1 STEP th1
  TC = TS
65 A = -LA: b = RN: C = -1: D = 1
70 CC = 2 * K0 * EXP(-BE * (TC - T0) / (T0 + 273)) * L * (UB / (H0)) ^ (N + 1) * H0 * SQR(2 * H0 * RB)
80 SI = 0
90 S = 0: HX = (b - A) / NN: HY = (D - C) / M: I = NN
```

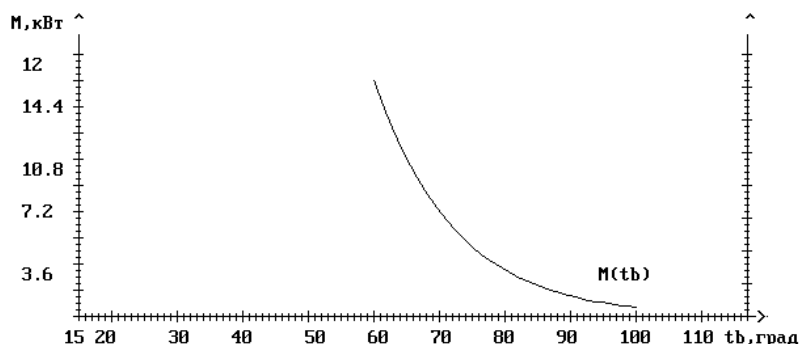
```

100 X = A + I * HX: J = M
110 Y = C + J * HY
120 IF I = 0 THEN 150 ELSE 130
130 IF I = N THEN 150 ELSE 140
140 IF I - INT(I) = 0 THEN 160 ELSE 170
150 P = .5: GOTO 180
160 P = 1: GOTO 180
170 P = 2
180 IF J = 0 THEN 210 ELSE 190
190 IF J = M THEN 210 ELSE 200
200 IF J - INT(J) = 0 THEN 220 ELSE 230
210 K = .5: GOTO 240
220 K = 1: GOTO 240
230 K = 2
240 S = S + P * K * HY * FNF(X, Y) / 9: J = J - .5
250 IF J >= 0 THEN 110 ELSE 260
260 I = I - .5: IF I >= 0 THEN 100 ELSE 270
270 IF ABS(SI - S) > E THEN 280 ELSE 300
280 SI = S: NN = 2 * NN: M = 2 * M: GOTO 90
300 M1 = CC * S
IF TS = 60 THEN MM = M1
LINE (TS1 * 5, 295 - MM * .065 / 6)-(TS * 5, 295 - M1 * .065 / 6), 7
MM = M1: TS1 = TS
NEXT TS
LOCATE 26, 1: PRINT "мощность диссипации при ТВmax M="; M1; "Вт"
LOCATE 27, 1: PRINT " u1="; UB; "м/с "; "ub1="; ub1 - uh1; "об/мин"; " u2="; (UB * fr); "м/с "; "ub2=";
(ub1 - uh1) * fr; "об/мин"
LOCATE 28, 1: PRINT "be="; BE; "k0="; K0; "r="; R; "м "; "h0="; H0; "м "; "x="; X
LOCATE 29, 1: PRINT " la="; LA; "n="; N; "L="; L; "м "; "t0="; T0; "град "; "rn="; RN
191 END

```

Результаты расчета программы 4

ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ДИССИПАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАЛКА



мощность диссипации при ТВmax M= 650.2322 Вт
u1= .231 м/с ub1= 27.5 об/мин u2= .28875 м/с ub2= 34.375 об/мин
be= 27 k0= 250000 r= 0 м h0= .001 м x=-.485
la= .485 n= .23 L= .3 м t0= 60 град rn= 3.74

Чтобы продолжить, нажмите любую клавишу

**ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ
ВАЛКА ВАЛЬЦОВ**

Блок 1. Начало.

Блок 2. Ввод исходных данных.

Блок 3. Определяются реакции в опорах вала R_A и R_B по эпюрам изгибающих моментов и поперечных сил.

Блок 4. Определяется крутящий момент $M_{кр}$, действующий на валок, по формуле $M_{кр} = 97400 (N / n)$.

Блок 5. Осуществляется обнуление переменной z для установления счетчика шагов по валку на ноль.

Блок 6. Задается цикл по x от 0 до l с шагом 0,1 м.

Блок 7. Вводится счетчик шагов по валку $z = z + 1$; осуществляется обнуление переменной i .

Блок 8. Вводится счетчик шагов по ступеням вала $i = i + 1$.

Блок 9. Определяется номер i текущей ступени вала: если текущее значение x меньше абсциссы i -й ступени вала $A(i, 5)$, то для дальнейших вычислений принимается номер ступени i и осуществляется переход на следующий блок, если x больше $A(i, 5)$, то возвращаемся в блок 7.

Блок 10. Рассчитываются температурные напряжения $\sigma(z)$ для i -й ступени вала по формуле

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = \frac{E\alpha T^*}{3(1-\mu)(r_2-r_1)} \left[3r_2 - \frac{2(r_2^3-r_1^3)}{r_2^2-r_1^2} \right],$$

где σ_{θ} – тангенсальные напряжения; σ_z – осевые напряжения; E – модуль упругости; α – коэффициент линейного расширения материала вала; $T^* = T_1 - T_2$ – максимальная разность температур на внутренней и наружной поверхностях; μ – коэффициент Пуассона; r_2 – наружный радиус вала; r_1 – внутренний радиус вала.

Блок 11. Определяется текущее значение x : если $x < l_1$, то переходят на блок 13, если $x > l_1$, то на блок 12.

Блок 12. Определяется текущее значение x : если $x < l_1 + l_2$, то переходят на блок 14, если $x > l_1 + l_2$, то переходят на блок 15.

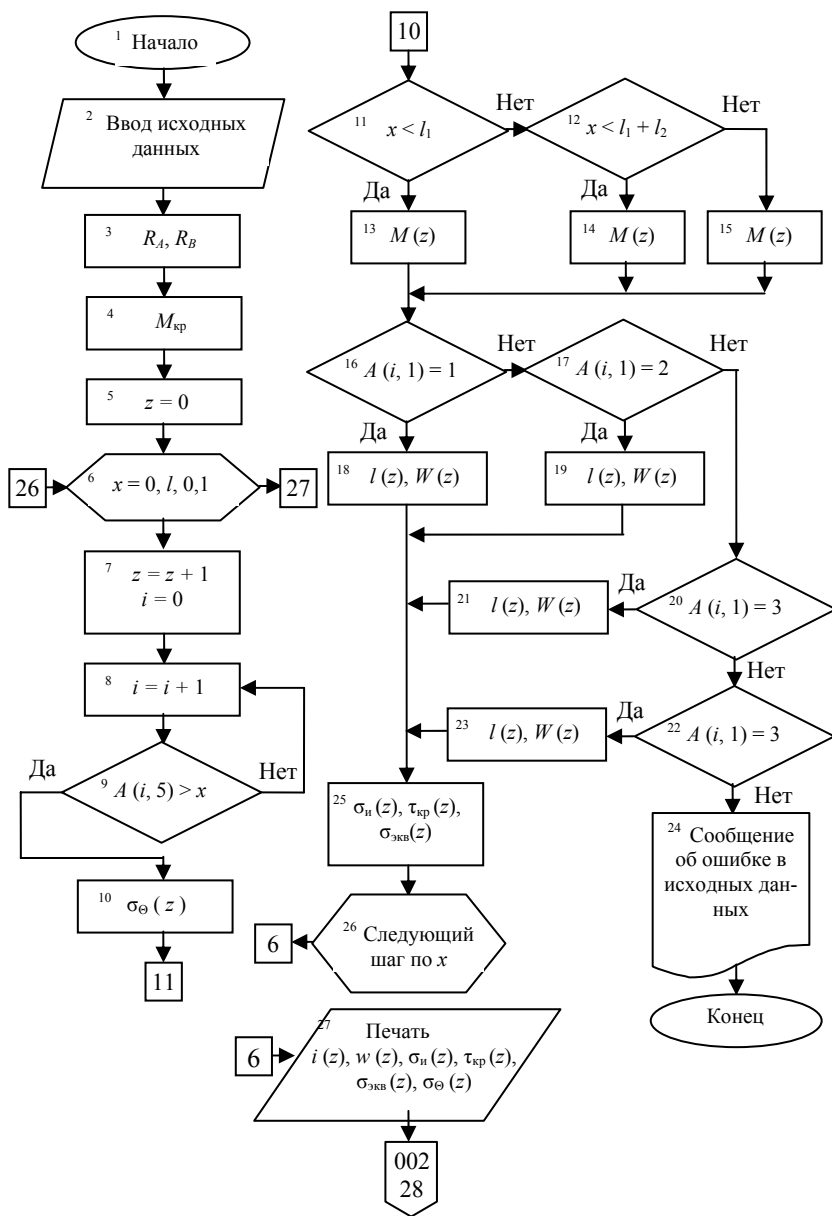


Рис. В. Блок-схема алгоритма расчета напряженного состояния валка

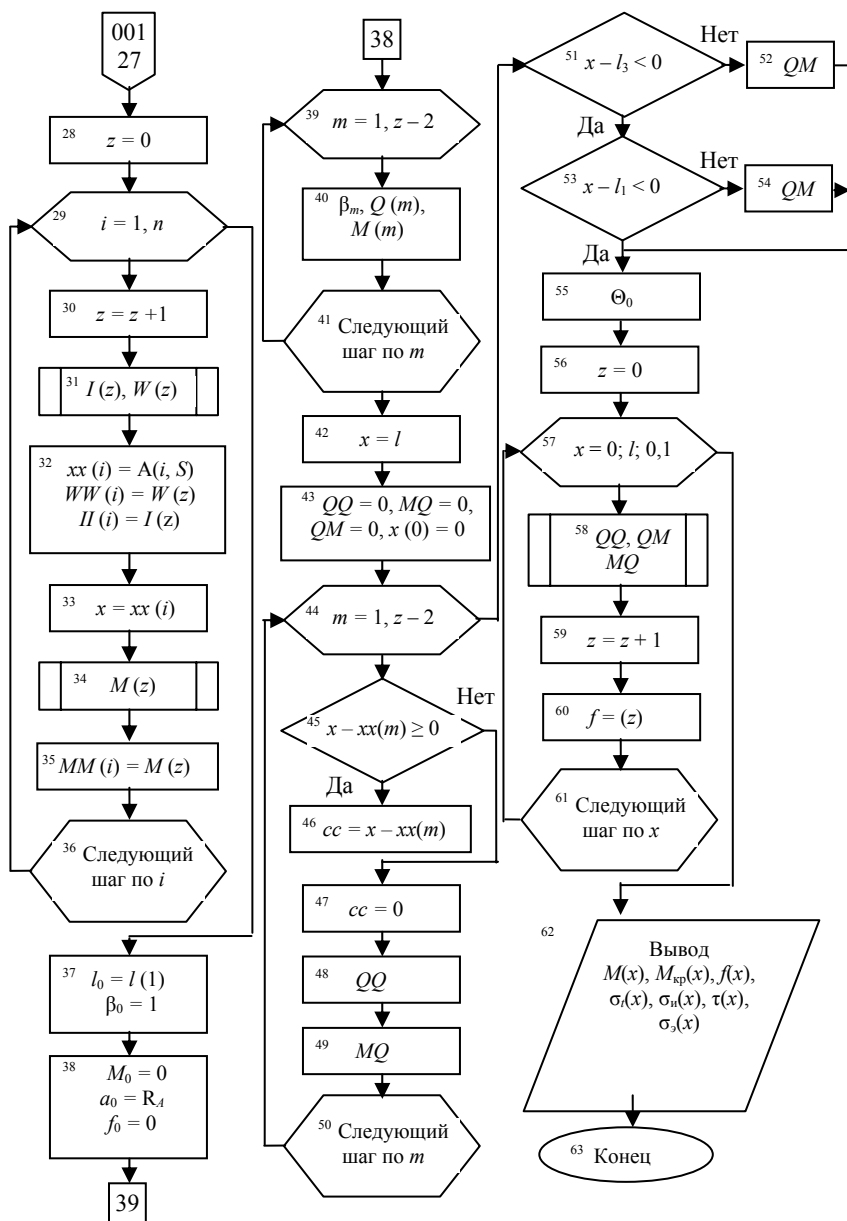


Рис. В. Окончание

Блок 13. Определяется изгибающий момент $M(z)$ для сечения с абсциссой x по формуле:

$$M = qb \frac{2c+b}{2l} z; \quad 0 \leq z \leq a.$$

Блок 14. Определяется изгибающий момент $M(z)$ для сечения с абсциссой x по формуле:

$$M = qb^2 \left[\frac{2c+b}{l} \frac{z}{b} - \frac{(z-a)^2}{b^2} \right]; \quad a \leq z \leq a+b.$$

Блок 15. Определяется изгибающий момент $M(z)$ для сечения с абсциссой x по формуле:

$$M = qb \frac{2a+b}{2l} (l+z); \quad a+b \leq z \leq l.$$

Блок 16. Определяется тип поперечного сечения вала: если $A(i, 1) = 1$, то переходят на блок 18, если это равенство не выполняется, то переходят на блок 17.

Блок 17. Определяется тип поперечного сечения вала: если $A(i, 1) = 2$, то переходят на блок 19, если это равенство не выполняется, то переходят на блок 20.

Блок 18. Определяются $J(z)$ и $W(z)$ для поперечного сечения вала типа 1 по формулам:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right];$$

$$W_x = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right].$$

Блок 19. Определяются $J(z)$ и $W(z)$ для поперечного сечения вала типа 2 по формулам:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{4};$$

$$W_x = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{2D}.$$

Блок 20. Определяется тип поперечного сечения вала: если $A(i, 1) = 3$, то переходят на блок 21, если это равенство не выполняется, то переходят на блок 22.

Блок 21. Определяются $J(z)$ и $W(z)$ для поперечного сечения вала типа 3 по формулам:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{2};$$

$$W_x = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right] - \frac{bt(D-t)^2}{D}.$$

Блок 22. Определяется тип поперечного сечения вала: если $A(i, 1) = 4$, то переходят на блок 23, если это равенство не выполняется, то на блок 24.

Блок 23. Определяются $J(z)$ и $W(z)$ для поперечного сечения вала типа 4 по формулам:

$$J_x = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] - \sum_{n=1}^k \left[\frac{\pi d_1^4}{64} + (r_1 |\sin(n-1)\alpha|)^2 \frac{\pi d_1^2}{4} \right];$$

$$W_x = \frac{2J_x}{D},$$

где $\alpha = \frac{360^\circ}{k}$; k – количество периферийных отверстий; d_1 – диаметр канала для подвода теплоносителя.

Блок 24. Сообщается об ошибке в исходных данных, так как для вала характерны 4 типа поперечного сечения, а программой ни один из этих типов не найден.

Блок 25. Определяются напряжения изгиба $\sigma_{и}(z)$, напряжения кручения $\tau_{кр}(z)$, эквивалентные напряжения $\sigma_{экр}(z)$ по формулам:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{2W_x}; \quad \sigma_{и} = \frac{M}{W_x};$$

$$\sigma_c = k\sigma_{и} + \sigma_\theta;$$

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma_c^2 + 4\tau^2}.$$

Блок 26. Следующий шаг по x . Переход на блок 6.

Блок 27. Распечатываются результаты вычислений моментов инерции $J(z)$ и сопротивления $W(z)$, напряжений температурных $\sigma_\theta(z)$, изгиба $\sigma_{и}(z)$, кручения $\tau_{кр}(z)$, эквивалентных $\sigma_{экр}(z)$.

Блок 28. Устанавливается на ноль счетчик шагов по валку.

Блок 29. Задается цикл по i от 1 до n .

Блок 30. Присваивается переменной z значение $z + 1$.

Блок 31. Определяются значения момента инерции $J(z)$ и $W(z)$ с использованием подпрограммы, описанной блоками 16 – 23.

Блок 32. Присваиваются переменным $xx(i)$, $WW(i)$ и $JJ(i)$ соответственно следующие значения: $A(i, 5)$, $W(z)$ и $J(z)$.

Блок 33. Задается текущая координата $x = xx(i)$.

Блок 34. Для сечения валка с заданной координатой x определяется изгибающий момент $M(z)$ с использованием подпрограммы, описанной блоками 11 – 15.

Блок 35. Присваивается переменной $MM(i)$ значение $M_n(z)$.

Блок 36. Следующий шаг по i , переход на блок 29.

Блок 37. Присваивается переменной J_0 значение момента инерции первой ступени $J(1)$, переменной β_0 – значение 1.

Блок 38. Присваиваются переменным M_0 и f_0 значение 0, переменной Q_0 – значение R_A .

Блок 39. Задается цикл по m от 1 до $z-2$ с шагом 1.

Блок 40. Определяются переменные β_m , $Q(m)$ и $M(m)$ по формулам:

$$\beta_1 = J_0/J_1; \quad \beta_2 = J_0/J_2; \quad \beta_3 = J_0/J_3;$$

$$\Delta Q_n = Q_n (\beta_{n+1} - \beta_n);$$

$$\Delta M_n = M_n (\beta_{n+1} - \beta_n).$$

Блок 41. Следующий шаг по m , переход на блок 39.

Блок 42. Присваивается переменной x значение l .

Блок 43. Осуществляется обнуление переменных QQ , MQ , QM и $x(0)$.

Блок 44. Задается цикл по m от 1 до $z-2$ с шагом 1.

Блок 45. Если разность $(x - xx(m)) \geq 0$, то переходят на блок 46, если это условие не соблюдается, то переходят на блок 47.

Блок 46. Присваивается переменной cc значение $cc = (x - xx(m))$.

Блок 47. Присваивается переменной cc значение 0; $cc = 0$.

Блок 48. Определяется по формуле $QQ = QQ + Q(m) cc^3 / 6$ значение переменной QQ .

Блок 49. Определяется по формуле $MQ = MQ + M(m) cc^2 / 2$ значение переменной MQ .

Блок 50. Следующий шаг по m ; переход на блок 44.

Блок 51. Если $(x - t_3) < 0$, то переходят на блок 53, если это условие не соблюдается, то переходят на блок 52.

Блок 52. Определяется по формуле $QM = q\beta_2 (x - j_3)^4 / 24 - q\beta_2 (x - l_2)^4 / 24$ значение переменной QM .

Блок 53. Если $(x - l) < 0$, то переходят на блок 55, если это условие не соблюдается, то переходят на блок 54.

Блок 54. Определяется по формуле $QM = -q\beta_2 (x - l_1)^4 / 24$ значение переменной QM .

Блок 55. Определяется значение начального угла поворота Θ_0 .

Блок 56. Присваивается переменной z значение 0.

Блок 57. Задается цикл по x от 0 до l с шагом 0,1 м.

Блок 58. Определяются суммы поперечных сил QQ , изгибающих моментов MQ , распределенных нагрузок QM , действующих слева от текущего сечения валка.

Блок 59. Выводится счетчик шагов по валку $z < z + 1$.

Блок 60. Определяется прогиб f в текущем сечении валка.

Блок 61. Следующий шаг по x ; переход на блок 22.

Блок 62. Распечатываются результаты вычислений прогиба валка f .

Блок 63. Конец

Идентификаторы к программе 5

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единица измерения
$A(l)$	–	Массив геометрических размеров валка	м
MW	–	Материал валка	–

α			
L	l	Расстояние между валковыми опорами	м
$L1$	l_1	Расстояние от левой опоры до начала действия распределенной нагрузки	м
$L2$	l_2	Расстояние от левой опоры до конца действия распределенной нагрузки	м
Q	q	Распределенная нагрузка, действующая на валок	Н/м
$B1$	b_1	Ширина шпоночного паза шейки вала	м
$T1$	t_1	Глубина шпоночного паза шейки вала	м
NP	$n_{п}$	Количество периферийных отверстий бочки вала	–
DP	d_p	Диаметр периферийных отверстий	м
ZP	$r_{п}$	Радиус расположения центров периферийных отверстий	м
TV	$t_{вн}$	Температура теплоносителя	°С
TN	$t_{нар}$	Температура на рабочей поверхности вала	°С
E	E	Модуль упругости материала вала	Н/м ²
KT	α	Коэффициент линейного расширения материала вала	1/°С
KP	μ	Коэффициент Пуассона материала вала	–
ND	N	Мощность приводного двигателя	кВт
V	U	Линейная скорость вращения вала	м/с
x	x	Текущая координата по оси абсцисс	м
$I(Z)$	I_x	Момент инерции текущего сечения	м ⁴
$W(Z)$	W_x	Момент сопротивления текущего сечения	м ³
$M(Z)$	$M(x)$	Изгибающий момент в текущем сечении	Н · м

Продолжение табл.

Идентификатор	Обозначение	Наименование величины	Единица измерения
N	n	Количество ступеней вала	–
$ST(Z)$	σ_t	Температурные напряжения в текущем сечении вала	МПа
$SI(Z)$	$\sigma_{и}$	Изгибающие напряжения в текущем сечении вала	МПа
$SK(Z)$	τ	Напряжение кручения в текущем сечении вала	МПа
$SE(Z)$	$\sigma_{экр}$	Эквивалентные напряжения в текущем сечении вала	МПа
$FP(Z)$	f	Прогиб вала в текущем сечении	м
PI	π	Число π	рад
KM	$M_{кр}$	Крутящий момент на валке	Н · м

SS (Z)	σ_c	Суммарные напряжения в текущем сечении валка	МПа
RA RB	$R_A,$ R_B	Реакции в опорах валка A и B	Н
AL	α_1	Угол между центрами смежных периферийных отверстий	\dots°

Программа 5

Расчет напряженно-деформационного состояния валка вальцов

```

99 CLS
100 WIDTH 80
101 DIM j(400), W(400), M(400), МК(400), J7(400), W7(400)
102 DIM SE(400), SI(400), SN(400), SS(400), SK(400)
103 DIM ST(400), ZX(400), X(400), BETA(400), M7(400)
104 DIM FP(400), XX(400), WW(400), JJ(400), MM(400)
105 DIM QS(400), MS(400), QQ(400), QM(400), MQ(400)
106 REM *Ввод исходных данных *
107 DATA 7,1,0.00,0.080,0.0001,0.04,0.00
108 DATA 1,0.00,0.095,0.04,0.11,.00
109 DATA 1,0.04,0.16,0.11,0.19,.04
110 DATA 4,0.04,0.16,0.19,0.35,.04
120 DATA 1,0.04,0.16,0.35,0.43,.04
130 DATA 1,0.04,0.95,0.43,0.394,.04
134 DATA 1,0.04,0.08,0.50,0.54,.04
140 READ N
150 FOR I = 1 TO N: FOR j = 1 TO 6
160 READ A(I, j)
165 NEXT j: NEXT I
170 DATA Сталь 40Л: READ MWS$
180 DATA 0.54,0.12,0.42,36000,135e6 : READ L, L1, L2, Q, SD
190 DATA .024,.009,42,0.0525,0.016 : READ B1, T1, NP, ZP, DP
200 DATA 75,63,2.1E11,10.5E-6,.3,5.5,0.284
210 READ TV, TN, E, KT, KP, ND, V
220 REM * Расчет напряженного состояния валка *
230 RA = Q * (L2 - L1) / 2: PI = 3.14159: NV = V * 60 / PI / A(3, 3): KM = 9740 * ND / NV: Z = 0
235 hx1 = L / 100
240 FOR X = 0 TO L STEP hx1

```

```

250 Z = Z + 1: X(Z) = X * 1
260 I = 0
270 I = I + 1
280 IF A(I, 5) > X THEN 300
290 GOTO 270
300 RTF = TV - TN
310 P1 = E * KT * RTF / (2 * (1 - KP) * LOG(A(I, 3) / A(I, 5)))
320 P2 = LOG(A(I, 3) / A(I, 5))
330 ST(Z) = P1 * (1 - 2 * (A(I, 5) / 2) ^ 2 / ((A(I, 3) / 2) ^ 2 - (A(I, 5) / 2) ^ 2) * P2)
340 GOSUB 410: GOSUB 490: GOSUB 580: J7(Z) = j(Z): W7(Z) = W(Z): M7(Z) = M(Z)
350 ZX(M) = ZX(NP)
360 SI(Z) = M(Z) / W(Z): SS(Z) = 1.5 * SI(Z) + ST(Z): SK(Z) = MK(Z) / W(Z) / 2
370 SE(Z) = (1 - KP) / 2 * SS(Z) + (1 + KP) * SQR(SS(Z) ^ 2 + 4 * SK(Z) ^ 2) / 2
380 GOTO 870
390 REM * Подпрограмма *
400 REM * Определение крутящего момента в текущем сечении *
410 IF X < L1 THEN 440
420 IF X < L THEN 430
430 MK(Z) = KM: GOTO 460
440 MK(Z) = 0: GOTO 460
450 MK(Z) = KM * (X - L1) / L2
460 RETURN
470 REM * Подпрограмма *
480 REM * Определение изгибающего момента в текущем сечении *
490 IF X < L1 THEN 520
500 IF X < L2 + L1 THEN 530
510 M(Z) = RA * X - Q * L2 * (X - L2 / 2 - L1): GOTO 540
520 M(Z) = RA * X: GOTO 540
530 M(Z) = RA * X - Q * (X - L1) ^ 2 / 2
540 RETURN
550 REM * Подпрограмма *
560 REM * Определение геометрических характеристик *
570 REM * текущего сечения *
580 IF A(I, 1) = 1 THEN 660
590 IF A(I, 1) = 2 THEN 690
600 IF A(I, 1) = 3 THEN 720
610 IF A(I, 1) = 4 THEN 750
620 PRINT "Ошибка следует искать в массиве A(i,j)"
630 PRINT "Неверно указан тип поперечного сечения."; I
640 GOTO 1370
650 REM *Сечение типа 1 *
660 j(Z) = PI * (A(I, 3) ^ 4 - A(I, 2) ^ 4) / 64
670 W(Z) = 2 * j(Z) / A(I, 3): GOTO 860
680 REM * Сечение типа 2 *
690 j(Z) = PI * (A(I, 3) ^ 4 - A(I, 2) ^ 4) / 64 - B1 * T1 * (A(I, 3) - T1) ^ 2/4
700 W(Z) = 2 * j(Z) / A(I, 3): GOTO 860
710 REM *Сечение типа 3 *
720 j(Z) = PI * (A(I, 3) ^ 4 - A(I, 2) ^ 4) / 64 - B1 * T1 * (A(I, 3) - T1) ^ 2/2
730 W(Z) = 2 * j(Z) / A(I, 3): GOTO 860
740 REM *Сечение типа 4 *
750 IF ZX(M) <> 0 THEN 830
760 AL = PI * 360 / NP / 180
770 ZX(0) = ZP
780 FOR M = 1 TO NP
790 ZX(M) = (ZP * COS((M - 1) * AL)) ^ 2

```

```

800 ZX(M) = ZX(M - 1) + ZX(M)
810 NEXT M
820 ZX(M) = ZX(NP)
830 JX1 = NP * PI * DP ^ 4 / 64 + ZX(M) * PI * DP ^ 2 / 4
840 j(Z) = PI * (A(I, 3) ^ 4 - A(I, 2) ^ 4) / 64 - JX1
850 W(Z) = 2 * j(Z) / A(I, 3)
860 RETURN
870 NEXT X
880 ZX = Z
890 REM * Печать результатов расчетов напряжений в валке *
900 F$ = "O": GOTO 930
910 F$ = "LPT1": GOTO 930
920 F$ = "WAL.DAT"
930 OPEN "O", #1, F$
1180 PRINT TAB(11); "Результаты вычислений": PRINT ""
1190 PRINT "-Реакции в опорах А, В равны соответственно"
1200 PRINT " RA="; RA; "H, RB="; RA; "H."
1210 PRINT "-Крутящий момент, действующий на валок"
1220 PRINT " МКР="; KM; "H*M": PRINT
1230 PRINT " X,м"; " JX(X),м^4"; " WX(X),м^3"; " МИ(X),H*м";
1240 PRINT " МКР(X),H*м"
1250 FOR A = 1 TO ZX
  SCREEN 11: LINE (40, 100)-(40, 348): LINE (40, 300)-(300, 300)
  LINE (265, 100)-(265, 300): FOR X = 40 TO 300 STEP 7.5
  LINE (X, 298)-(X, 302), 6: NEXT X: FOR X1 = 40 TO 300 STEP 75 / 2
  LINE (X1, 296)-(X1, 304), 6: NEXT X1: FOR Y1 = 340 TO 100 STEP -4
  LINE (38, Y1)-(42, Y1), 7: NEXT Y1: FOR Y2 = 340 TO 100 STEP -20
  LINE (36, Y2)-(44, Y2), 7: NEXT Y2: FOR T1 = 300 TO 100 STEP -6
  LINE (263, T1)-(267, T1), 6: NEXT T1: FOR T2 = 300 TO 100 STEP -30
  LINE (261, T2)-(269, T2), 6: NEXT T2: LOCATE 20, 6: PRINT "0"
  LOCATE 20, 10: PRINT "0.1": LOCATE 20, 14: PRINT "0.2": LOCATE 20, 18: PRINT "0.3"
  LOCATE 20, 23: PRINT "0.4": LOCATE 20, 28: PRINT "0.5": LOCATE 20, 37: PRINT "X,М"
  LOCATE 12, 27: PRINT "Ми(X)": LOCATE 12, 15: PRINT "Мкр(X)"
  LOCATE 6, 6: PRINT "Ми, H*м": LOCATE 13, 1: PRINT "1000": LOCATE 18, 1: PRINT "200"
  LOCATE 15, 1: PRINT "600": LOCATE 10, 1: PRINT "1400": LOCATE 8, 1: PRINT "1800"
  LOCATE 21, 1: PRINT "-200": LOCATE 6, 32: PRINT "Мкр, H*м"
  LOCATE 16, 35: PRINT "1200": LOCATE 14, 35: PRINT "1800"
  LOCATE 12, 35: PRINT "2400": LOCATE 18, 35: PRINT "600"
  LINE (40 + X(A) * 375, 300 - M7(A) * .1)-(40 + (X(A) - hx1) * 375, 300 - M71 * .1)
  LINE (40 + X(A) * 375, 300 - MK(A) * .1 / 2)-(40 + (X(A) - hx1) * 375, 300 - MK1 * .1 / 2)
  M71 = M7(A): MK1 = MK(A)
  LOCATE 24, 5: PRINT "Мкр max = "; MK(A); "H*м"
  '1260 PRINT USING " ###"; X(A);
  '1270 PRINT USING " #####^"; J7(A); W7(A); M7(A); MK(A)
  1280 NEXT A
  '1300 PRINT " X,М"; " ST(X),МПа"; " СИ(X),МПа"; " Т(X),МПа";
  '1310 PRINT " S3KB(X),МПа"
  1320 FOR A = 1 TO ZX
  LOCATE 23, 2: PRINT "-Крутящий момент, действующий на валок "; " МКР="; KM; "H*м"
  LOCATE 24, 2: PRINT "-Реакции в опорах А, В равны соответственно "; " RA="; RA; "H, RB="; RA; "H"
  LINE (50, 100)-(50, 300): LINE (50, 300)-(300, 300): LINE (350, 300)-(600, 300)
  LINE (250, 100)-(250, 340): LINE (555, 100)-(555, 300)
  LINE (350, 100)-(350, 300): FOR F1 = 300 TO 100 STEP -5
  LINE (553, F1)-(557, F1), 6: NEXT F1: FOR F2 = 340 TO 100 STEP -5
  LINE (248, F2)-(252, F2), 6: NEXT F2: FOR F3 = 300 TO 100 STEP -5

```

```

LINE (348, F3)-(352, F3), 6: NEXT F3: FOR F2 = 300 TO 100 STEP -20
LINE (551, F2)-(559, F2), 6: NEXT F2: FOR F4 = 340 TO 100 STEP -20
LINE (246, F4)-(254, F4), 6: NEXT F4: FOR F5 = 300 TO 100 STEP -20
LINE (346, F5)-(354, F5), 6: NEXT F5: FOR X = 50 TO 300 STEP 5
LINE (X, 298)-(X, 302), 6: NEXT X: FOR X1 = 50 TO 300 STEP 50
LINE (X1, 296)-(X1, 304), 6: NEXT X1: FOR X3 = 350 TO 600 STEP 5
LINE (X3, 298)-(X3, 302), 6: NEXT X3: FOR X4 = 350 TO 600 STEP 50
LINE (X4, 296)-(X4, 304), 6: NEXT X4: FOR Y1 = 300 TO 100 STEP -5
LINE (48, Y1)-(52, Y1), 7: NEXT Y1: FOR Y2 = 300 TO 100 STEP -25
LINE (46, Y2)-(54, Y2), 7: NEXT Y2: LOCATE 20, 45: PRINT "0": LOCATE 20, 56: PRINT "0.4"
LOCATE 20, 62: PRINT "0.6": LOCATE 20, 50: PRINT "0.2": LOCATE 20, 37: PRINT "X,M"
LOCATE 20, 26: PRINT "0.6": LOCATE 20, 13: PRINT "0.2": LOCATE 20, 72: PRINT "X,M"
LOCATE 15, 3: PRINT "7.5": LOCATE 18, 3: PRINT "2.5": LOCATE 20, 7: PRINT "0": LOCATE 20, 18:
PRINT "0.4"
LOCATE 16, 3: PRINT "5.0": LOCATE 13, 3: PRINT "10.0": LOCATE 11, 3: PRINT "12.5"
LOCATE 16, 33: PRINT "6.0": LOCATE 18, 33: PRINT "2.0": LOCATE 14, 33: PRINT "8.0"
LOCATE 17, 33: PRINT "4.0": LOCATE 13, 33: PRINT "10.0": LOCATE 12, 33: PRINT "12.0"
LOCATE 12, 71: PRINT "30.0": LOCATE 18, 71: PRINT "5.0": LOCATE 21, 33: PRINT "-2.0"
LOCATE 17, 71: PRINT "10.0": LOCATE 14, 71: PRINT "20.0": LOCATE 11, 71: PRINT "35.0"
LOCATE 16, 71: PRINT "15.0": LOCATE 13, 71: PRINT "25.0": LOCATE 9, 71: PRINT "40.0"
LOCATE 18, 40: PRINT "5.0": LOCATE 14, 40: PRINT "20.0": LOCATE 17, 40: PRINT "10.0"
LOCATE 12, 40: PRINT "30.0": LOCATE 11, 40: PRINT "35.0": LOCATE 10, 40: PRINT "40.0"
LOCATE 3, 1: PRINT "ЭПЮРЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ, ИЗГИБАЮЩИХ, ЭКВИВАЛЕНТНЫХ,
КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ"
LOCATE 5, 5: PRINT "ST*0.5,МПа": LOCATE 16, 40: PRINT "15.0"
LOCATE 5, 40: PRINT "SE,МПа": : LOCATE 13, 40: PRINT "25.0"
LOCATE 5, 25: PRINT "SI*0.5,МПа": LOCATE 5, 68: PRINT "SK,МПа":
LOCATE 9, 20: PRINT "ST(X)": LOCATE 16, 23: PRINT "SI(X)"
LOCATE 8, 61: PRINT "SE(X)": LOCATE 14, 60: PRINT "SK(X)"
LINE (50 + X(A) * 250, 300 - ST(A) * .000005)-(50 + (X(A) - HX1) * 250, 300 - ST1 * .000005)
LINE (50 + X(A) * 250, 300 - SI(A) * .000005)-(50 + (X(A) - HX1) * 250, 300 - SI1 * .000005)
LINE (350 + X(A) * 250, 300 - SK(A) * .0000075 / 2)-(350 + (X(A) - HX1) * 250, 300 - SK1 * .0000075 / 2)
LINE (350 + X(A) * 250, 300 - SE(A) * .000004)-(350 + (X(A) - HX1) * 250, 300 - SE1 * .000004)
'1330 PRINT USING " ###.###"; X(A);
'1340 PRINT USING " ###.###"; ST(A) / 1000000; SI(A) / 1000000;
'1350 PRINT USING " ###.###"; SK(A) / 1000000; SE(A) / 1000000:
ST1 = ST(A): SI1 = SI(A): SK1 = SK(A): SE1 = SE(A)
NEXT A
1351 MAX = ABS(M7(1))
1352 FOR A = 1 TO ZX
1353 IF ABS(M7(A)) >= MAX THEN MAX = ABS(M7(A))
1354 NEXT A
1360 MAX = ABS(SE(1))
1361 FOR A = 1 TO ZX
1362 IF ABS(SE(A)) >= MAX THEN MAX = ABS(SE(A))
1363 NEXT A
1365 IF MAX <= SD THEN 1366 ELSE 1367
1366 LOCATE 26, 1: PRINT "УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ, ТАК КАК Sэкв max < [S] ":
GOTO 1368
1367 LOCATE 26, 1: PRINT "УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ НЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ, ТАК КАК Sэкв max > [S]
"
1368 LOCATE 25, 1: PRINT "Sэкв max = "; MAX / 1000000; "МПа "; "[S]="; SD / 1000000!; "МПа "
1369 END
LOCATE 23, 5: PRINT "Ми max = "; MAX; "H*м"
1370 PRINT "": IF RZ = 1 GOTO 1710

```

```

1380 REM * Определение прогиба валка по методу *
1390 REM * начальных параметров *
1400 Z = 0
1410 FOR I = 1 TO N
1420 Z = Z + 1
1430 GOSUB 580
1440 XX(I) = A(I, 4): WW(I) = W(Z): JJ(I) = j(Z): X = XX(I)
1450 GOSUB 490
1460 MM(I) = M(Z)
1470 NEXT I
1480 MS(0) = 0: QS(0) = RA: FP(0) = 0: J0 = JJ(1): BETA(0) = I
1490 FOR M = 1 TO Z - 2
1500 BETA(M) = j(0) / JJ(M + 1)
1510 QS(M) = -ABS(RA * (BETA(M - 1) - BETA(M)))
1520 MS(M) = MM(M) * (BETA(M - 1) - BETA(M)) * (-1)
1530 NEXT M
1540 X = L
1550 GOSUB 1910
1560 T0 = -(QS(0) * X ^ 3 / 6 + QQ + MQ + QM) / E / J0 / X
1570 S = 0
1575 HX = L / 10
1580 FOR X = 0 TO L STEP HX
1590 GOSUB 1910
1600 S = S + 1
1610 X(S) = X
1620 FP(S) = T0 * X + (QS(0) * X ^ 3 / 6 + QQ + MQ + QM) / E / J0
1630 NEXT X
1640 LOCATE 1, 10: PRINT "Начальные параметры:"
1650 LOCATE 2, 10: PRINT " W0 - начальный прогиб, м "; FP(0)
1660 LOCATE 3, 10: PRINT " T0 - начальный угол поворота, рад "; T0
1670 LOCATE 4, 10: PRINT " Q0 - начальная поперечная сила, Н "; RA
1680 LOCATE 5, 10: PRINT " Ми0 - начальный изгибающий момент, Н*м "; M0
1710 MJ = INT((S + 3) / 4)
1720 FOR K = 1 TO MJ
1740 FOR I = (4 * K - 3) TO 4 * K
1750 IF I <= S THEN 1780
1760 GOTO 1780
1780 NEXT I
1800 FOR I = (4 * K - 3) TO 4 * K
  IF I = 1 THEN HX = 0 ELSE HX = L / 10
  LINE (350, 100)-(350, 300): LINE (350, 300)-(600, 300)
  FOR X = 350 TO 600 STEP 7.5
  LINE (X, 298)-(X, 302), 6: NEXT X: FOR X1 = 350 TO 600 STEP 75 / 2
  LINE (X1, 296)-(X1, 304), 6: NEXT X1: FOR Y1 = 300 TO 100 STEP -5
  LINE (348, Y1)-(352, Y1), 7: NEXT Y1: FOR Y2 = 300 TO 100 STEP 25
  LINE (346, Y2)-(354, Y2), 7: NEXT Y2: LOCATE 20, 44: PRINT "0"
  LOCATE 20, 48: PRINT "0.1": LOCATE 20, 57: PRINT "0.3": LOCATE 20, 76: PRINT "X,м"
  LOCATE 20, 72: PRINT "0.6": LOCATE 20, 53: PRINT "0.2": LOCATE 20, 76: PRINT "X,м"
  LOCATE 20, 67: PRINT "0.5": LOCATE 20, 62: PRINT "0.4": LOCATE 9, 55: PRINT "W(X)"
  LOCATE 15, 40: PRINT "0.75": LOCATE 18, 40: PRINT "0.25": LOCATE 6, 40: PRINT "W,мм"
  LOCATE 16, 40: PRINT "0.5": LOCATE 13, 40: PRINT "1.0": LOCATE 11, 40: PRINT "1.25"
1810 IF I > S THEN 1840
1812 LINE (350 + X(I) * 375, 300 - FP(I) * 100000)-(350 + (X(I) - HX) * 375, 300 - FP1 * 100000), 7
1815 FP1 = FP(I)
'1820 PRINT USING "###.###^ ^ ^ ^ "; FP(I) : GOTO 1840

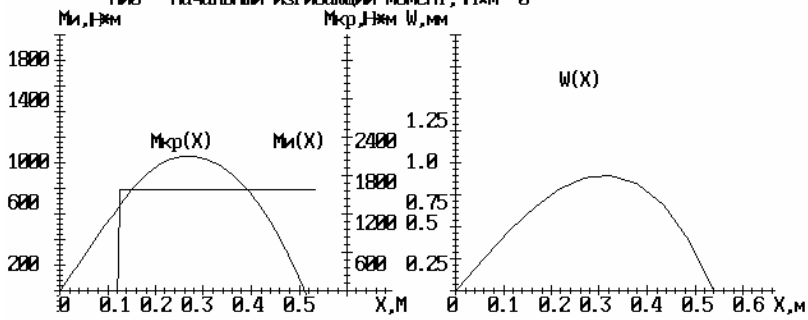
```

```
'1830 PRINT " ";
1843 IF ABS(FP(I)) >= MAX1 THEN MAX1 = ABS(FP(I))
LOCATE 25, 5: PRINT "W max = "; MAX1; "м "
1840 NEXT I
1860 NEXT K: IF RZ = 1 THEN 2070
1870 GOTO 2070
1890 REM * Определение суммарных нагрузок слева *
1900 REM * от текущего сечения *
1910 QQ = 0: MQ = 0: XX(0) = 0: QM = 0
1920 FOR M = 1 TO Z - 2
1930 IF X - XX(M) >= 0 THEN 1950
1940 CC = 0: GOTO 1960
1950 CC = X - XX(M)
1960 QQ = QQ + QS(M) * CC ^ 3 / 6
1970 MQ = MQ + MS(M) * CC ^ 2 / 2
1980 NEXT M
1990 IF X - L < 0 THEN 2010
2000 QM = Q * BETA(2) * (X - L) ^ 4 / 24 - Q * BETA(2) * (X - L1) ^ 4 / 24
2010 IF X - L1 < 0 THEN 2030
2020 QM = -Q * BETA(2) * (X - L1) ^ 4 / 24
2030 RETURN: END
2070 END: REM * Конец программы *
```

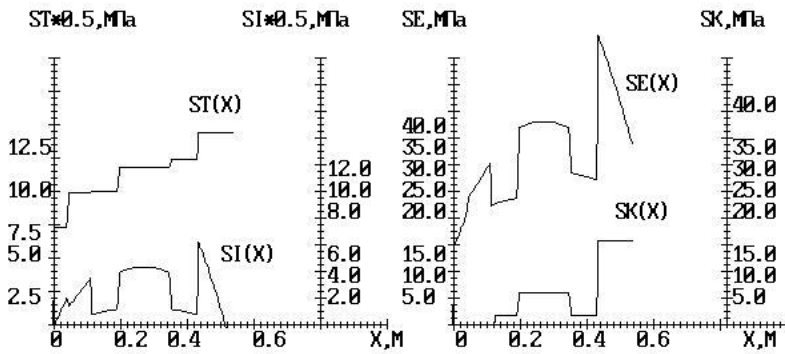
Результаты расчета программы 5

Начальные параметры:

W_0 - начальный прогиб, м 0
 T_0 - начальный угол поворота, рад $4.358902E-03$
 Q_0 - начальная поперечная сила, Н 5400
 M_0 - начальный изгибающий момент, Н·м 0



$M_i \text{ max} = 1053 \text{ Н·м}$
 $M_{kr} \text{ max} = 1580.234 \text{ Н·м}$
 $W \text{ max} = 9.02203E-04 \text{ м}$



- Крутящий момент, действующий на валок $M_{KP} = 1580.234 \text{ Н·м}$
 - Реакции в опорах А, В равны соответственно $R_A = 5400 \text{ Н}$, $R_B = 5400 \text{ Н}$
 $\sigma_{\text{сжв max}} = 54.182716 \text{ МПа}$ $[\sigma] = 135 \text{ МПа}$
 УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ, ТАК КАК $\sigma_{\text{сжв max}} < [\sigma]$

Чтобы продолжить, нажмите любую клавишу

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ СТАНИНЫ ВАЛЬЦОВ ЛАБОРАТОРНЫХ

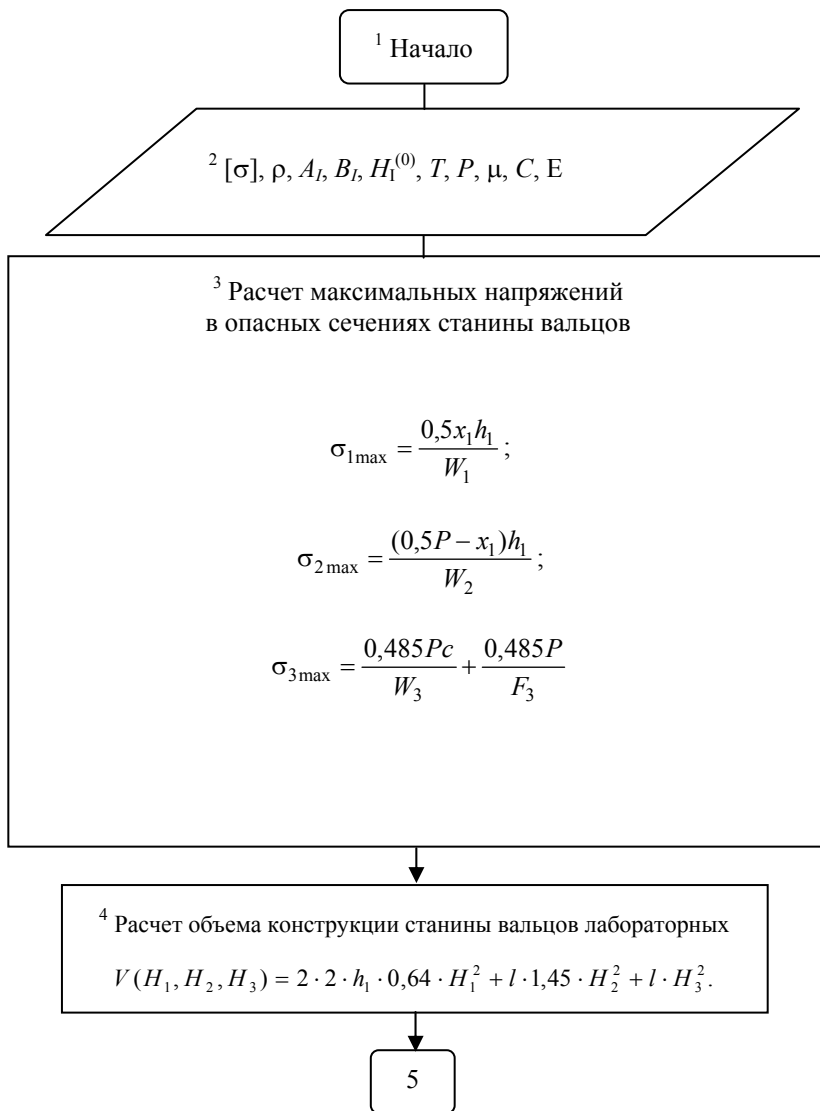


РИС. Г. БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ СТАНИНЫ ВАЛЬЦОВ

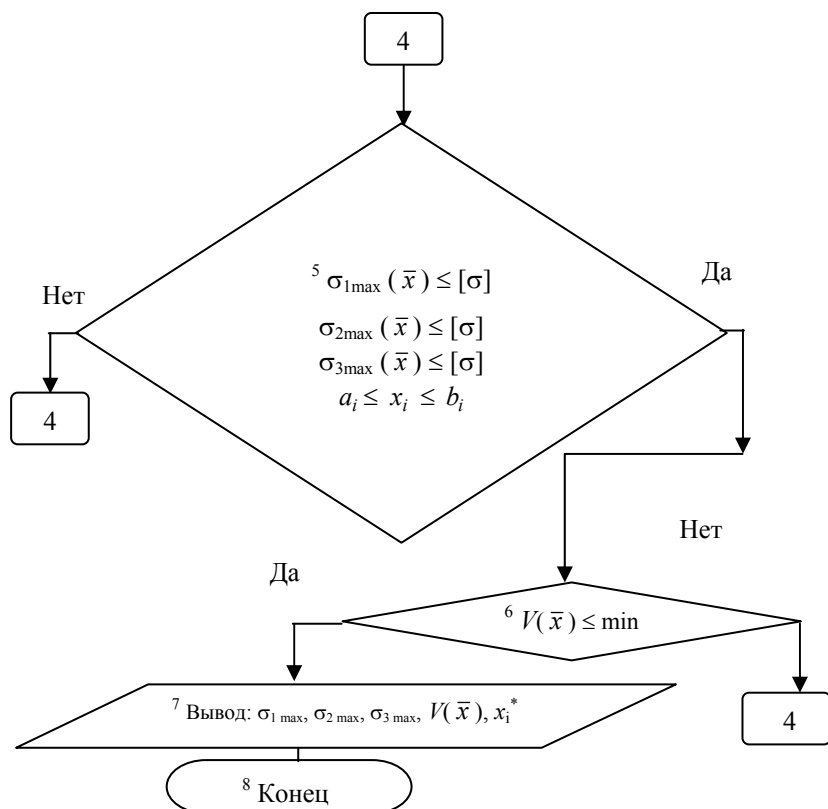


РИС. Г. ОКОНЧАНИЕ

Идентификаторы к программе 6

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1. Допускаемое напряжение материала станины при растяжении, МПа	$[\sigma]_r$	SIGr
2. Допускаемое напряжение материала станины при изгибе, МПа	$[\sigma]_u$	SIGu
3. Плотность материала станины, кг/м ³	ρ	RO

Продолжение табл.

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
----------------------	-------------	--

4. Распорное усилие, действующее на станину вальцов, Н	P	\mathbf{P}
5. Наименьшие размеры сечений станины, м	a_i	
6. Наибольшие размеры сечений станины, м	b_i	
7. Максимальное напряжение в боковых стойках, Па	σ_1	SIGst
8. Максимальное напряжение в нижнем поясе, Па	σ_2	SIGor
9. Максимальное напряжение в траверсе, Па	σ_3	SIGtr
10. Варьируемые параметры	H I $($ 0 $)$	x_i
11. Объем конструкции станины	$V(x)$	$R\#(10)$

Программа 6

Расчет оптимальных параметров станины вальцов

***** StroLbOp *****

*Минимизация целевой функции методом скользящего допуска *

* Расчет станины вальцов лабораторных *

DECLARE SUB FEAS ()

DECLARE SUB STAR ()

DECLARE SUB WRIT ()

```

DECLARE SUB SUMR ()
DECLARE SUB prob (INQ!)
DIM SHARED X#(50), X1#(50, 50), X2#(50, 50), R#(100), R1#(100), R2#(100), R3#(100),
SUM#(50), F#(50), SR#(50), ROLD#(100), H#(50), FLG#(10), a#(50, 50)
COMMON SHARED kik, NX, NC, NIC, STEP0#, ALFA#, BETA#, GAMA#, IN, INF, FDIFER#,
SEQL#, k1, k2, k3, k4, k5, k6, K7, K8, K9, FOLD#, L5, L6, L7, L8, L9, R1A#, R2A#, R3A#
OPEN "StroLbOp.res" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "      Расчет станины вальцов лабораторных"
PRINT "      Расчет станины вальцов лабораторных"
PRINT "-----"
PRINT #1, "      -----"
FDIFER# = 1#
NX = 3      'общее число переменных
NC = 0      'общее число ограничений в виде равенств
NIC = 9     'общее число ограничений в виде неравенств
SIZE# = 5#  'опред. размер деформ. многогранника
CONVER# = .001# 'используется для окончания поиска
ALFA# = 1#
BETA# = .5#
GAMA# = 2#
10 STEP0# = SIZE#
X#(1) = 105#      'координаты
X#(2) = 80#       'стартовой
X#(3) = 80#       'точки
' CALL prob(3)
'PRINT "ДЛЯ ВВОДА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НАЖМИТЕ F2 и выберите PROB "
'INPUT "FFF"; FFF
'IF FFF=1 THEN OPEN F2
    IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 9999
'PRINT "введите начальные значения варьируемых параметров, [мм]"
'INPUT "x#(1) ="; x#(1)
'INPUT "x#(2) ="; x#(2)
'INPUT "x#(3) ="; x#(3)
PRINT " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT #1, "      <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT "-----"
PRINT #1, "      -----"
PRINT " ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: "; NX
PRINT #1, "      ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: "; NX
PRINT " ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : "; NC
PRINT #1, "      ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : "; NC
PRINT "      2).НЕРАВЕНСТВ: "; NIC
PRINT #1, "      2).НЕРАВЕНСТВ: "; NIC
PRINT " ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: "; SIZE#
PRINT #1, "      ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА:
"; SIZE#
PRINT " ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: "; CONVER#
PRINT #1, "      ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: "; CONVER#
k1 = NX + 1
k2 = NX + 2

```

```

k3 = NX + 3
k4 = NX + 4
k5 = NX + 5
k6 = NC + NIC
K7 = NC + 1
K8 = NC + NIC
K9 = K8 + 1
N = NX - NC
N1 = N + 1
IF N1 >= 3 THEN GOTO 50
N1 = 3
N = 2
50  N2 = N + 2
N3 = N + 3
N4 = N + 4
N5 = N + 5
N6 = N + 6
N7 = N + 7
N8 = N + 8
XN = N
XNX = NX
XN1 = N1
R1A# = .5# * (SQR(5#) - 1#)
R2A# = R1A# * R1A#
R3A# = R2A# * R1A#
L5 = NX + 5
L6 = NX + 6
L7 = NX + 7
L8 = NX + 8
L9 = NX + 9
ICONT = 1
NCONT = 1
PRINT " НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"
PRINT #1, " НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"
FOR J = 1 TO NX
  PRINT " X("; J; ") = "; X#(J)
  PRINT #1, "          X("; J; ") = "; X#(J)
NEXT J
FDIFER# = 2# * (NC + 1) * STEP0#
FOLD# = FDIFER#
IN = N1
CALL SUMR
SR#(N1) = SQR(SEQL#)
PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
PRINT #1, "          FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
IF SR#(N1) < FDIFER# THEN GOTO 341
CALL WRIT
INF = N1
STEP0# = .05# * FDIFER#
CALL FEAS

```

```

PRINT " SR(INF) ="; SR#(INF)
PRINT #1, "          SR(INF) ="; SR#(INF)
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
341 PRINT "*****"
PRINT #1, "*****"
PRINT " HOMEП CЧETA:"; ICONТ, " FDIFER ="; FDIFER#
PRINT #1, "          HOMEП CЧETA:"; ICONТ, "FDIFER ="; FDIFER#
CALL WRIT
FTER# = R#(K9)
STEP1# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) + XNX - 1#) / (XNX * SQR(2#))
STEP2# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) - 1#) / (XNX * SQR(2#))
ETA# = (STEP1# + (XNX - 1#) * STEP2#) / (XNX + 1#)
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X#(J) - ETA#
NEXT J
CALL STAR
FOR I = 1 TO N1
  FOR J = 1 TO NX
    X2#(I, J) = X1#(I, J)
  NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO N1
  IN = I
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(I, J)
  NEXT J
  CALL SUMR
  SR#(I) = SQR(SEQЛ#)
  IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 8
  CALL FEAS
  IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
8  CALL prob(3)
  F#(I) = R#(K9)
NEXT I
1000
STEP0# = .05# * FDIFER#
ICONТ = ICONТ + 1
FH# = F#(1)
LHIGH = 1
FOR I = 2 TO N1
  IF F#(I) < FH# THEN GOTO 166
  FH# = F#(I)
  LHIGH = I
166 NEXT I
41 FL# = F#(1)
LOW = 1
FOR I = 2 TO N1
  IF FL# < F#(I) THEN GOTO 177
  FL# = F#(I)
  LOW = I

```

```

177 NEXT I
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X2#(LOW, J)
    NEXT J
    IN = LOW
    CALL SUMR
    SR#(LOW) = SQR(SEQ#)
    IF SR#(LOW) < FDIFER# THEN GOTO 87
    INF = LOW
    CALL FEAS
    IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
    CALL prob(3)
    F#(LOW) = R#(K9)
    GOTO 41
87  FOR J = 1 TO NX
    SUM2# = 0#
    FOR I = 1 TO N1
        SUM2# = SUM2# + X2#(I, J)
    NEXT I
    X2#(N2, J) = 1# / XN * (SUM2# - X2#(LHIGH, J))
NEXT J
SUM2# = 0#
FOR I = 1 TO N1
    FOR J = 1 TO NX
        SUM2# = SUM2# + (X2#(I, J) - X2#(N2, J)) ^ 2
    NEXT J
NEXT I
FDIFER# = (NC + 1) / XN1 * SQR(SUM2#)
IF FDIFER# < FOLD# THEN GOTO 98
FDIFER# = FOLD#
GOTO 198
98  FOLD# = FDIFER#
198  FTER# = F#(LOW)
    PRINT "-----", FDIFER#
    NCONT = NCONT + 1
    IF NCONT < 4 * N1 THEN GOTO 37
    IF ICONT < 1500 THEN GOTO 337
    FOLD# = .5# * FOLD#
337  NCONT = 0
    PRINT "*****"
    PRINT #1, "*****"
    PRINT " HOMEPC#ETA: "; ICONT, " FDIFER = "; FDIFER#
    PRINT #1, "      HOMEPC#ETA: "; ICONT, "FDIFER = "; FDIFER#
    CALL WRIT
37  IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 81
    IF LHIGH = 1 THEN GOTO 43
    FS# = F#(1)
    LSEC = 1
    GOTO 44
43  FS# = F#(2)

```

```

LSEC = 2
44  FOR I = 1 TO N1
    IF LHIGH = I THEN GOTO 18
    IF F#(I) < FS# THEN GOTO 18
    FS# = F#(I)
    LSEC = I
18  NEXT I
    FOR J = 1 TO NX
X2#(N3, J) = X2#(N2, J) + ALFA# * (X2#(N2, J) - X2#(LHIGH, J))
    X#(J) = X2#(N3, J)
    NEXT J
    IN = N3
    CALL SUMR
    SR#(N3) = SQR(SEQ#)
    IF SR#(N3) < FDIFER# THEN GOTO 82
    INF = N3
    CALL FEAS
    IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
82  CALL prob(3)
    F#(N3) = R#(K9)
    IF F#(N3) < F#(LOW) THEN GOTO 84
    IF F#(N3) < F#(LSEC) THEN GOTO 92
    GOTO 60
92  FOR J = 1 TO NX
    X2#(LHIGH, J) = X2#(N3, J)
    NEXT J
    SR#(LHIGH) = SR#(N3)
    F#(LHIGH) = F#(N3)
    GOTO 1000
84  FOR J = 1 TO NX
    X2#(N4, J) = X2#(N2, J) + GAMA# * (X2#(N3, J) - X2#(N2, J))
    X#(J) = X2#(N4, J)
    NEXT J
    IN = N4
    CALL SUMR
    SR#(N4) = SQR(SEQ#)
    IF SR#(N4) < FDIFER# THEN GOTO 25
    INF = N4
    CALL FEAS
    IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
25  CALL prob(3)
    F#(N4) = R#(K9)
    IF F#(LOW) < F#(N4) THEN GOTO 92
    FOR J = 1 TO NX
    X2#(LHIGH, J) = X2#(N4, J)
    NEXT J
    F#(LHIGH) = F#(N4)
    SR#(LHIGH) = SR#(N4)
    GOTO 1000
60  IF F#(N3) > F#(LHIGH) THEN GOTO 64

```

```

FOR J = 1 TO NX
  X2#(LHIGH, J) = X2#(N3, J)
NEXT J
64 FOR J = 1 TO NX
  X2#(N4, J) = BETA# * X2#(LHIGH, J) + (1# - BETA#) * X2#(N2, J)
  X#(J) = X2#(N4, J)
NEXT J
IN = N4
CALL SUMR
SR#(N4) = SQR(SEQL#)
IF SR#(N4) < FDIFER# THEN GOTO 67
INF = N4
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
67 CALL prob(3)
F#(N4) = R#(K9)
IF F#(LHIGH) > F#(N4) THEN GOTO 68
FOR J = 1 TO NX
  FOR I = 1 TO N1
    X2#(I, J) = .5# * (X2#(I, J) + X2#(LOW, J))
  NEXT I
NEXT J
FOR I = 1 TO N1
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(I, J)
  NEXT J
  IN = I
  CALL SUMR
  SR#(I) = SQR(SEQL#)
  IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 72
  INF = I
  CALL FEAS
  IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
72 CALL prob(3)
F#(I) = R#(K9)
NEXT I
GOTO 1000
68 FOR J = 1 TO NX
  X2#(LHIGH, J) = X2#(N4, J)
NEXT J
SR#(LHIGH) = SR#(N4)
F#(LHIGH) = F#(N4)
GOTO 1000
81 CLS
PRINT "*****"
PRINT #1, " *****"
PRINT " HOMEР СЧЕТА:"; ICONТ, " FDIFER ="; FDIFER#
PRINT #1, " HOMEР СЧЕТА:"; ICONТ, "FDIFER ="; FDIFER#
CALL WRIT
PRINT " ФИНАЛ"

```



```

PRINT #1, "      ФИНАЛ"
GOTO 10
80  CLS
PRINT "*****"
PRINT #1, "      *****"
PRINT "  НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, "  FDIFER ="; FDIFER#
PRINT #1, "      НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, "  FDIFER ="; FDIFER#
CALL WRIT
PRINT "  НЕТ ФИНАЛА"
PRINT #1, "      НЕТ ФИНАЛА"
SOUND 440, 10
SLEEP 30
GOTO 10
9999 PRINT "-----STOP-----"
PRINT #1, " -----STOP-----"
SOUND 210, 20
CLOSE
END

SUB FEAS
ALFA# = 1#: BETA# = .5#: GAMA# = 2#
XNX = NX
ICONT = 0
LCHEK = 0
ICHEK = 0
250 CALL STAR
FOR I = 1 TO k1
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X1#(I, J)
  NEXT J
  IN = I
  CALL SUMR
NEXT I
28  SUMH# = SUM#(1)
INDEX = 1
FOR I = 2 TO k1
  IF SUM#(I) <= SUMH# THEN GOTO 7
  SUMH# = SUM#(I)
  INDEX = I
7  NEXT I
SUML# = SUM#(1)
KOUNT = 1
FOR I = 2 TO k1
  IF SUML# <= SUM#(I) THEN GOTO 888
  SUML# = SUM#(I)
  KOUNT = I
888 NEXT I
FOR J = 1 TO NX
  SUM2# = 0#
  FOR I = 1 TO k1

```

```

    SUM2# = SUM2# + X1#(I, J)
NEXT I
X1#(k2, J) = 1# / XNX * (SUM2# - X1#(INDEX, J))
X1#(k3, J) = 2# * X1#(k2, J) - X1#(INDEX, J)
X#(J) = X1#(k3, J)
NEXT J
IN = k3
CALL SUMR
IF SUM#(k3) < SUML# THEN GOTO 11
IF INDEX = 1 THEN GOTO 38
SUMS# = SUM#(1)
GOTO 39
38 SUMS# = SUM#(2)
39 FOR I = 1 TO k1
    IF (INDEX - I) = 0 THEN GOTO 12
    IF SUM#(I) <= SUMS# THEN GOTO 12
    SUMS# = SUM#(I)
12 NEXT I
    IF SUM#(k3) > SUMS# THEN GOTO 13
GOTO 14
11 FOR J = 1 TO NX
    X1#(k4, J) = X1#(k2, J) + 2# * (X1#(k3, J) - X1#(k2, J))
    X#(J) = X1#(k4, J)
NEXT J
IN = k4
CALL SUMR
IF SUM#(k4) < SUML# THEN GOTO 16
GOTO 14
13 IF SUM#(k3) > SUMH# THEN GOTO 170
FOR J = 1 TO NX
    X1#(INDEX, J) = X1#(k3, J)
NEXT J
170 FOR J = 1 TO NX
    X1#(k4, J) = .5# * (X1#(INDEX, J) + X1#(k2, J))
    X#(J) = X1#(k4, J)
NEXT J
IN = k4
CALL SUMR
IF SUMH# > SUM#(k4) THEN GOTO 601
FOR J = 1 TO NX
    FOR I = 1 TO k1
        X1#(I, J) = .5# * (X1#(I, J) + X1#(KOUNT, J))
    NEXT I
NEXT J
FOR I = 1 TO k1
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(I, J)
    NEXT J
IN = I
CALL SUMR

```

```

NEXT I
555  SUML# = SUM#(1)
      KOUNT = 1
      FOR I = 2 TO k1
        IF SUML# < SUM#(I) THEN GOTO 233
        SUML# = SUM#(I)
        KOUNT = I
233  NEXT I
      SR#(INF) = SQR(SUM#(KOUNT))
      FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(KOUNT, J)
      NEXT J
      GOTO 26
601  FOR J = 1 TO NX
      X1#(INDEX, J) = X1#(k4, J)
      NEXT J
      SUM#(INDEX) = SUM#(k4)
      GOTO 555
16   FOR J = 1 TO NX
      X1#(INDEX, J) = X1#(k4, J)
      X#(J) = X1#(INDEX, J)
      NEXT J
      SUM#(INDEX) = SUM#(k4)
      SR#(INF) = SQR(SUM#(k4))
      GOTO 26
14   FOR J = 1 TO NX
      X1#(INDEX, J) = X1#(k3, J)
      X#(J) = X1#(INDEX, J)
      NEXT J
      SUM#(INDEX) = SUM#(k3)
      SR#(INF) = SQR(SUM#(k3))
26   ICONT = ICONT + 1
      FOR J = 1 TO NX
        X2#(INF, J) = X#(J)
      NEXT J
      IF ICONT < (2 * k1) THEN GOTO 500
      ICONT = 0
      FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(k2, J)
      NEXT J
      IN = k2
      CALL SUMR
      DIFER# = 0#
      FOR I = 1 TO k1
        DIFER# = DIFER# + (SUM#(I) - SUM#(k2)) ^ 2
      NEXT I
      DIFER# = 1# / (K7 * XNX) * SQR(DIFER#)
      IF DIFER# > 1E-14 THEN GOTO 500
      IN = k1
      STEP0# = 20# * FDIFER#

```

```

CALL SUMR
SR#(INF) = SQR(SEQ#)
FOR J = 1 TO NX
  X1#(k1, J) = X#(J)
NEXT J
FOR J = 1 TO NX
  FACTOR# = 1#
  X#(J) = X1#(k1, J) + FACTOR# * STEP0#
  X1#(L9, J) = X#(J)
  IN = L9
  CALL SUMR
  X#(J) = X1#(k1, J) - FACTOR# * STEP0#
  X1#(L5, J) = X#(J)
  IN = L5
  CALL SUMR
56  IF SUM#(L9) < SUM#(k1) THEN GOTO 54
  IF SUM#(L5) < SUM#(k1) THEN GOTO 55
  GOTO 97
54  X1#(L5, J) = X1#(k1, J)
  SUM#(L5) = SUM#(k1)
  X1#(k1, J) = X1#(L9, J)
  SUM#(k1) = SUM#(L9)
  FACTOR# = FACTOR# + 1#
  X#(J) = X1#(k1, J) + FACTOR# * STEP0#
  IN = L9
  CALL SUMR
  GOTO 56
55  X1#(L9, J) = X1#(k1, J)
  SUM#(L9) = SUM#(k1)
  X1#(k1, J) = X1#(L5, J)
  SUM#(k1) = SUM#(L5)
  FACTOR# = FACTOR# + 1#
  X#(J) = X1#(k1, J) - FACTOR# * STEP0#
  IN = L5
  CALL SUMR
  GOTO 56
97  H#(J) = X1#(L9, J) - X1#(L5, J)
  X1#(L6, J) = X1#(L5, J) + H#(J) * R1A#
  X#(J) = X1#(L6, J)
  IN = L6
  CALL SUMR
  X1#(L7, J) = X1#(L5, J) + H#(J) * R2A#
  X#(J) = X1#(L7, J)
  IN = L7
  CALL SUMR
  IF SUM#(L6) > SUM#(L7) THEN GOTO 688
  X1#(L8, J) = X1#(L5, J) + (1# - R3A#) * H#(J)
  X1#(L5, J) = X1#(L7, J)
  X#(J) = X1#(L8, J)
  IN = L8

```

```

CALL SUMR
IF SUM#(L8) > SUM#(L6) THEN GOTO 76
X1#(L5, J) = X1#(L6, J)
SUM#(L5) = SUM#(L6)
GOTO 75
76  X1#(L9, J) = X1#(L8, J)
SUM#(L9) = SUM#(L8)
GOTO 75
688  X1#(L9, J) = X1#(L6, J)
X1#(L8, J) = X1#(L5, J) + R3A# * H#(J)
X#(J) = X1#(L8, J)
IN = L8
CALL SUMR
STEP0# = SIZE#
SUM#(L9) = SUM#(L6)
IF SUM#(L7) > SUM#(L8) THEN GOTO 71
X1#(L5, J) = X1#(L8, J)
SUM#(L5) = SUM#(L8)
GOTO 75
71  X1#(L9, J) = X1#(L7, J)
SUM#(L9) = SUM#(L7)
75  IF ABS(X1#(L9, J) - X1#(L5, J)) > .01# * FDIFER# THEN GOTO 97
X1#(k1, J) = X1#(L7, J)
X#(J) = X1#(L7, J)
SUM#(k1) = SUM#(L5)
SR#(INF) = SQR(SUM#(k1))
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 760
NEXT J
ICHEK = ICHEK + 1
STEP0# = FDIFER#
IF ICHEK <= 2 THEN GOTO 250
FOLD# = 1E-12
PRINT " ПОДПРОГРАММА FEAS"
PRINT #1, "          ПОДПРОГРАММА FEAS"
FOR J = 1 TO NX
  PRINT X#(J)
  PRINT #1, "          "; X#(J)
NEXT J
PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(INF) ="; SR#(INF)
PRINT #1, "          FDIFER ="; FDIFER#, " SR(INF) ="; SR#(INF)
GOTO 46
760 FOR J = 1 TO NX
  X2#(INF, J) = X1#(k1, J)
  X#(J) = X1#(k1, J)
NEXT J
500 IF SR#(INF) > FDIFER# THEN GOTO 28
IF SR#(INF) > 0# THEN GOTO 35
CALL prob(3)
FINT# = R#(K9)
FOR J = 1 TO NX

```

```

    X#(J) = X2#(INF, J)
NEXT J
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO K8
    R1#(J) = R#(J)
NEXT J
FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X1#(KOUNT, J)
NEXT J
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO K8
    R3#(J) = R#(J)
NEXT J
FOR J = 1 TO NX
    H#(J) = X1#(KOUNT, J) - X2#(INF, J)
    X#(J) = X2#(INF, J) + .5# * H#(J)
NEXT J
CALL prob(2)
FLG#(1) = 0#
FLG#(2) = 0#
FLG#(3) = 0#
FOR J = K7 TO K8
    IF R3#(J) >= 0 THEN GOTO 404
    FLG#(1) = FLG#(1) + R1#(J) * R1#(J)
    FLG#(2) = FLG#(2) + R#(J) * R#(J)
    FLG#(3) = FLG#(3) + R3#(J) * R3#(J)
404 NEXT J
SR#(INF) = SQR(FLG#(1))
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 35
ALFA1# = FLG#(1) - 2# * FLG#(2) + FLG#(3)
BETA1# = 3# * FLG#(1) - 4# * FLG#(2) + FLG#(3)
RATIO# = BETA1# / (4# * ALFA1#)
FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(INF, J) + H#(J) * RATIO#
NEXT J
IN = INF
CALL SUMR
SR#(INF) = SQR(SEQL#)
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 465
FOR I = 1 TO 20
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X#(J) - .05# * H#(J)
    NEXT J
    CALL SUMR
    SR#(INF) = SQR(SEQL#)
    IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 465
NEXT I
465 CALL prob(3)
IF FINT# > R#(K9) THEN GOTO 46
SR#(INF) = 0#

```

```

GOTO 35
46 FOR J = 1 TO NX
    X2#(INF, J) = X#(J)
NEXT J
35 FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(INF, J)
NEXT J
END SUB

SUB prob (INQ)
'PRINT "ввод силовой нагрузки [H]"
PP = 40000
'PRINT "ввод геометрических параметров [мм]"
LL = 645: hh1 = 110: HH = 80
'PRINT "ввод допускаемого напряжения [МПа]"
SIGr = 25: SIGu = 41
NN0 = .5 * PP * (5 * hh1 ^ 3 * .121 * X#(2) ^ 4 + 6 * hh1 ^ 2 * LL * .0535 * X#(1) ^ 4) / (8 * hh1 ^ 3 *
.121 * X#(2) ^ 4 + 6 * hh1 ^ 2 * LL * .0535 * X#(1) ^ 4)
'PRINT "ДЛЯ НАЧАЛА ВЫЧИСЛЕНИЙ НАЖМИТЕ F5"
SIGtr = NN0 / X#(3) ^ 2 + NN0 * HH / 2 / .167 / X#(3) ^ 3
SIGst = NN0 * hh1 / X#(1) ^ 3 / .107
SIGor = (PP - 2 * NN0) * hh1 / X#(2) ^ 3 / .242
PRINT "SIGtr="; SIGtr; "SIGst="; SIGst; "SIGor="; SIGor;
' PRINT #1, "SIGtr="; SIGtr; "SIGst="; SIGst; "SIGor="; SIGor;
IF INQ = 2 THEN GOTO 100
IF INQ = 3 THEN GOTO 200
'ограничений в виде равенств нет
GOTO 300
'ограничения в виде неравенств
100 R#(1) = 1 - SIGtr / SIGr
R#(2) = 1 - SIGst / SIGu
R#(3) = 1 - SIGor / SIGu
R#(4) = 1 - 80 / X#(1)
R#(5) = 125 / X#(1) - 1
R#(6) = 1 - 55 / X#(2)
R#(7) = 125 / X#(2) - 1
R#(8) = 1 - 55 / X#(3)
R#(9) = 125 / X#(3) - 1
GOTO 300
'целевая функция
200 R#(10) = 4 * hh1 * .64 * X#(1) ^ 2 + 1.45 * X#(2) ^ 2 * LL + X#(3) ^ 2 * LL
300 PRINT #1, "SIGtr="; SIGtr; "SIGst="; SIGst; "SIGor="; SIGor;
END SUB

SUB STAR
VN = NX
STEP1# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) + VN - 1#)
STEP2# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) - 1#)
FOR J = 1 TO NX
    a#(1, J) = 0#

```

```

NEXT J
FOR I = 2 TO k1
  FOR J = 1 TO NX
    a#(I, J) = STEP2#
  NEXT J
  L = I - 1
  a#(I, L) = STEP1#
NEXT I
FOR I = 1 TO k1
  FOR J = 1 TO NX
    X1#(I, J) = X#(J) + a#(I, J)
  NEXT J
NEXT I
END SUB

SUB SUMR
SUM#(IN) = 0#
CALL prob(2)
SEQL# = 0#
IF NIC = 0 THEN GOTO 444
FOR J = K7 TO K8
  IF R#(J) >= 0# THEN GOTO 111

  SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
111 NEXT J
444 IF NC = 0 THEN GOTO 313
CALL prob(1)
FOR J = 1 TO NC
  SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
NEXT J
313 SUM#(IN) = SEQL#
END SUB

SUB WRIT
CALL prob(3)
PRINT " ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ (ОБЪЕМ КОНСТРУКЦИИ), V= "; R#(K9) / 1E+09; "[м^3]"
PRINT #1, "ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ "; R#(K9) / 1E+09; "[м^3]"
PRINT " ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
PRINT #1, "ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
FOR J = 1 TO NX
  'IF J = 1 THEN PRINT ", X1": GOTO 22
  'IF J = 2 THEN PRINT ", X2": GOTO 22
  'IF J = 3 THEN PRINT ", X3"
22 PRINT " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[мм]"
  PRINT #1, " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[мм]"
NEXT J
IF NC = 0 THEN GOTO 6
CALL prob(1)
FOR J = 1 TO NC
  PRINT " H("; J; ") = "; R#(J)

```



```

PRINT #1, "      H("; J; "): "; R#(J)
NEXT J
6  IF NIC = 0 THEN GOTO 503
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO k6
  'PRINT " G("; J; "): "; R#(J)
  'PRINT #1, "      G("; J; "): "; R#(J)
NEXT J
503  END SUB

```

Результаты расчета по программе 6

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 1.451360009849072D-02 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 105 [м]

ВЕКТОР: X(2) = 80 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 80 [мм]

SIGtr= 12.10952 SIGst= 10.21354 SIGor= 1.057739

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 4.33093281252141D-03 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 73.71056933964947 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 32.59551758995622 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 52.9334405678941 [мм]

SIGtr= 39.15122 SIGst= 50.96795 SIGor= 3.797111

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 4.33093281252141D-03 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 73.71056933964947 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 32.59551758995622 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 52.9334405678941 [мм]

SIGtr= 39.15122 SIGst= 50.96795 SIGor= 3.797111

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 6.917336786146818D-03 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 78.78379294196185 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 54.23491772141654 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 61.23418867334804 [мм]

SIGtr= 25.1804 SIGst= 40.41381 SIGor= 4.425219

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 7.034317218468434D-03 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 79.81410617786389 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 54.82412094500474 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 61.37162038926437 [мм]

SIGtr= 25.03095 SIGst= 38.8811 SIGor= 4.250582

НОМЕР СЧЕТА: 228 FDIFER = 9.615862677166486D-04

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 7.059827710659645D-03 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 79.91228791857387 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 54.96668346776631 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 61.45311038397004 [мм]

SIGtr= 24.93335 SIGst= 38.73034 SIGor= 4.238336

ФИНАЛ

**ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ СТАНИНЫ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВАЛЬЦОВ С РАСПОРНЫМ УСИЛИЕМ 1000 кН**

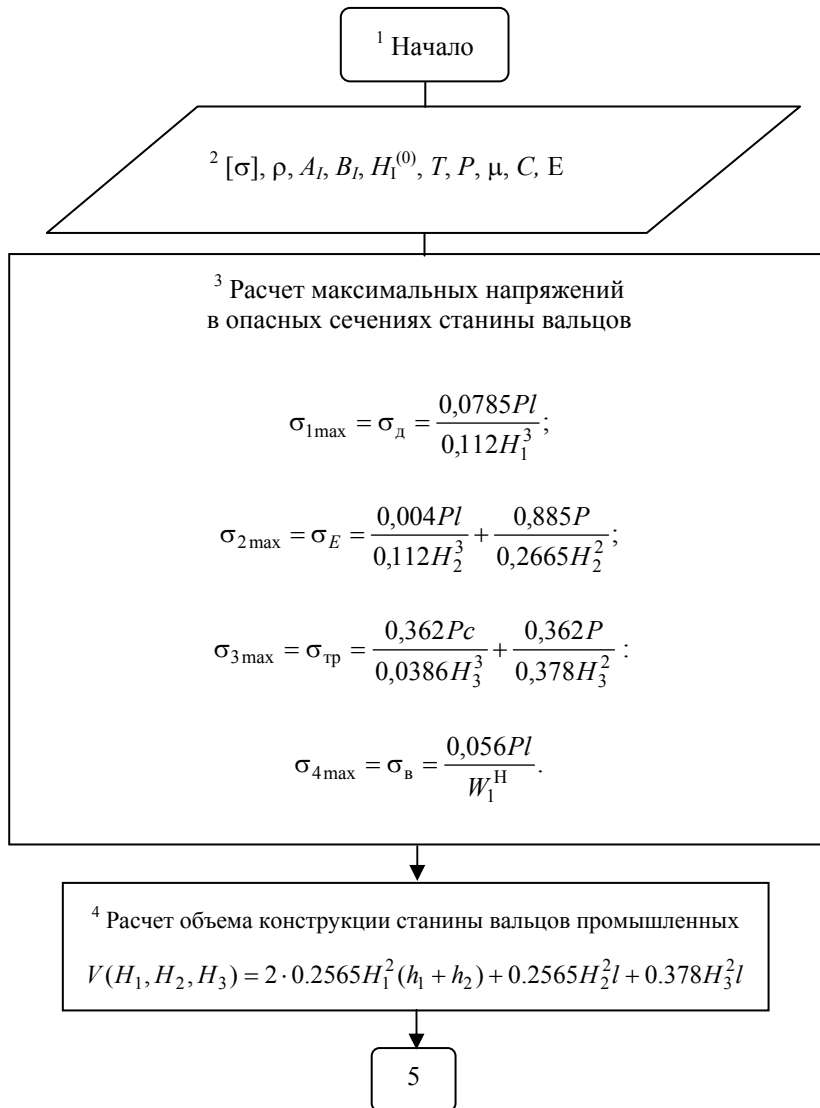


РИС. Д. БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ СТАНИНЫ ВАЛЬЦОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ

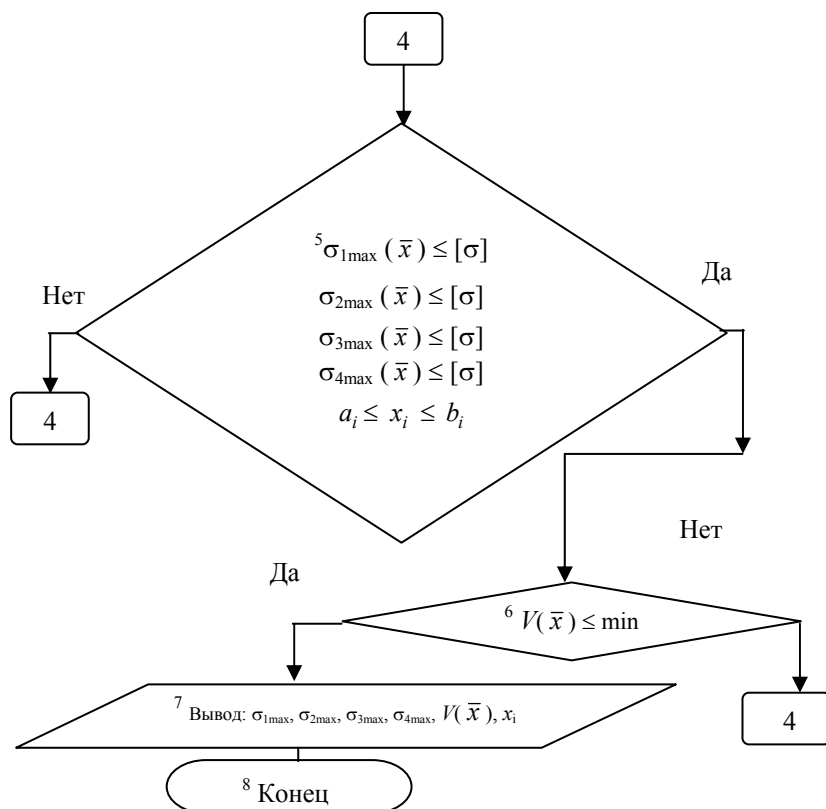


Рис. Д. Окончание

Идентификаторы к программе 7

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1. Допускаемое напряжение материала станины при изгибе, МПа	[σ]	SIG
2. Плотность материала станины, кг/м ³	ρ	RO

Продолжение табл.

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
3. Распорное усилие, дейст-	P	PP

вующее на станину вальцов, Н		
4. Наименьшие размеры сечений станины, м	a_i	
5. Наибольшие размеры сечений станины, м	b_i	
6. Максимальное напряжение в боковых стойках, Па	σ_1	SIGst
7. Максимальное напряжение в нижнем поясе, Па	σ_2	SIGor
8. Максимальное напряжение в траверсе, Па	σ_3	SIGtr
9. Максимальное напряжение в ригле, Па	σ_4	SIGrg
10. Варьируемые параметры	H I (0)	x_i
11. Объем конструкции станины	$V(x)$	R#(10)

Блок 1. Начало

Блок 2. Ввод исходных данных: $[\sigma]$, ρ , a_i , b_i , $H_1^{(0)}$, T , P , μ , C , E .

Блок 3. Расчет максимальных напряжений в опасных сечениях станины вальцов: $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$, $\sigma_{3\max}$, $\sigma_{4\max}$.

Блок 4. Расчет объема конструкции станины вальцов $V(\bar{x})$.

Блок 5. Проверка выполнения условий прочности и граничных условий варьируемых параметров.

Блок 6. Проверка минимального значения объема конструкции станины вальцов.

Блок 7. Вывод результатов процесса оптимизации: $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$, $\sigma_{3\max}$, $\sigma_{4\max}$, $V(\bar{x})$, x_i

Блок 8. Конец.

Программа 7

REM "имя файла - СтВПрОпт.bas"

REM Минимизация целевой функции методом скользящего допуска

REM " Расчет станин вальцов промышленных "

DECLARE SUB FEAS ()

DECLARE SUB STAR ()

DECLARE SUB WRIT ()

DECLARE SUB SUMR ()

DECLARE SUB prob (INQ!)

DIM SHARED X#(50), X1#(50, 50), X2#(50, 50), R#(100), R1#(100), R2#(100), R3#(100), SUM#(50), F#(50), SR#(50), ROLD#(100), H#(50), FLG#(10), a#(50, 50)

COMMON SHARED kik, NX, NC, NIC, STEP0#, ALFA#, BETA#, GAMA#, IN, INF, FDIFER#, SEQL#, k1, k2, k3, k4, k5, k6, K7, K8, K9, FOLD#, L5, L6, L7, L8, L9, R1A#, R2A#, R3A#

```

OPEN "СтВПрОпт.res" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, " Расчет станины вальцов промышленных"
PRINT "      Расчет станины вальцов промышленных"
PRINT "-----"
PRINT #1, "      -----"
FDIFER# = 1#
NX = 3      'общее число переменных
NC = 0      'общее число ограничений в виде равенств
NIC = 10    'общее число ограничений в виде неравенств
SIZE# = 5#  'опред. размер деформ. многогранника
CONVER# = .001# 'используется для окончания поиска
ALFA# = 1#
BETA# = .5#
GAMA# = 2#
10 STEP0# = SIZE#
X#(1) = 80#  'координаты
X#(2) = 80#  'стартовой
X#(3) = 80#  'точки
' CALL prob(3)
'PRINT "ДЛЯ ВВОДА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НАЖМИТЕ КНОПКУ F2 и выберите PROB "
IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 9999
'PRINT "введите начальные значения варьируемых параметров, [мм]"
PRINT " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT #1, "      <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT "-----"
PRINT #1, "      -----"
PRINT " ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: "; NX
PRINT #1, "      ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: "; NX
PRINT " ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : "; NC
PRINT #1, "      ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : "; NC
PRINT "      2).НЕРАВЕНСТВ: "; NIC
PRINT #1, "      2).НЕРАВЕНСТВ: "; NIC
PRINT " ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: "; SIZE#
PRINT #1, "      ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: "; SIZE#
PRINT " ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: "; CONVER#
PRINT #1, "      ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: "; CONVER#
k1 = NX + 1
k2 = NX + 2
k3 = NX + 3
k4 = NX + 4
k5 = NX + 5
k6 = NC + NIC
K7 = NC + 1
K8 = NC + NIC
K9 = K8 + 1
N = NX - NC
N1 = N + 1
IF N1 >= 3 THEN GOTO 50
N1 = 3
N = 2

```

```

50  N2 = N + 2
    N3 = N + 3
    N4 = N + 4
    N5 = N + 5
    N6 = N + 6
    N7 = N + 7
    N8 = N + 8
    XN = N
    XNX = NX
    XN1 = N1
    R1A# = .5# * (SQR(5#) - 1#)
    R2A# = R1A# * R1A#
    R3A# = R2A# * R1A#
    L5 = NX + 5
    L6 = NX + 6
    L7 = NX + 7
    L8 = NX + 8
    L9 = NX + 9
    ICONT = 1
    NCONT = 1
    PRINT " НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"
    PRINT #1, "      НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"
    FOR J = 1 TO NX
        PRINT " X("; J; ") = "; X#(J)
        PRINT #1, "      X("; J; ") = "; X#(J)
    NEXT J
    FDIFER# = 2# * (NC + 1) * STEP0#
    FOLD# = FDIFER#
    IN = N1
    CALL SUMR
    SR#(N1) = SQR(SEQ#)
    PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
    PRINT #1, "      FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
    IF SR#(N1) < FDIFER# THEN GOTO 341
    CALL WRIT
    INF = N1
    STEP0# = .05# * FDIFER#
    CALL FEAS
    PRINT " SR(INF) ="; SR#(INF)
    PRINT #1, "      SR(INF) ="; SR#(INF)
    IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
341 PRINT " HOME# СЧЕТА:"; ICONT, " FDIFER ="; FDIFER#
    PRINT #1, "      HOME# СЧЕТА:"; ICONT, "FDIFER ="; FDIFER#
    CALL WRIT
    FTER# = R#(K9)
    STEP1# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) + XNX - 1#) / (XNX * SQR(2#))
    STEP2# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) - 1#) / (XNX * SQR(2#))
    ETA# = (STEP1# + (XNX - 1#) * STEP2#) / (XNX + 1#)
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X#(J) - ETA#

```

```

NEXT J
CALL STAR
FOR I = 1 TO N1
  FOR J = 1 TO NX
    X2#(I, J) = X1#(I, J)
  NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO N1
  IN = I
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(I, J)
  NEXT J
  CALL SUMR
  SR#(I) = SQR(SEQL#)
  IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 8
  CALL FEAS
  IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
8  CALL prob(3)
  F#(I) = R#(K9)
  NEXT I
1000
STEP0# = .05# * FDIFER#
  ICONT = ICONT + 1
  FH# = F#(1)
  LHIGH = 1
  FOR I = 2 TO N1
    IF F#(I) < FH# THEN GOTO 166
    FH# = F#(I)
    LHIGH = I
166 NEXT I
41  FL# = F#(1)
  LOW = 1
  FOR I = 2 TO N1
    IF FL# < F#(I) THEN GOTO 177
    FL# = F#(I)
    LOW = I
177 NEXT I
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(LOW, J)
  NEXT J
  IN = LOW
  CALL SUMR
  SR#(LOW) = SQR(SEQL#)
  IF SR#(LOW) < FDIFER# THEN GOTO 87
  INF = LOW
  CALL FEAS
  IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
  CALL prob(3)
  F#(LOW) = R#(K9)
  GOTO 41

```

```

87  FOR J = 1 TO NX
    SUM2# = 0#
    FOR I = 1 TO N1
        SUM2# = SUM2# + X2#(I, J)
    NEXT I
    X2#(N2, J) = 1# / XN * (SUM2# - X2#(LHIGH, J))
NEXT J
SUM2# = 0#
FOR I = 1 TO N1
    FOR J = 1 TO NX
        SUM2# = SUM2# + (X2#(I, J) - X2#(N2, J)) ^ 2
    NEXT J
NEXT I
FDIFER# = (NC + 1) / XN1 * SQR(SUM2#)
IF FDIFER# < FOLD# THEN GOTO 98
FDIFER# = FOLD#
GOTO 198
98  FOLD# = FDIFER#
198  FTER# = F#(LOW)
    PRINT "-----", FDIFER#
    NCONT = NCONT + 1
    IF NCONT < 4 * N1 THEN GOTO 37
    IF ICONT < 1500 THEN GOTO 337
    FOLD# = .5# * FOLD#
337  NCONT = 0
    PRINT " HOME P C4ETA: "; ICONT, " FDIFER = "; FDIFER#
    PRINT #1, "      HOME P C4ETA: "; ICONT, "FDIFER = "; FDIFER#
    CALL WRIT
37  IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 81
    IF LHIGH = 1 THEN GOTO 43
    FS# = F#(1)
    LSEC = 1
    GOTO 44
43  FS# = F#(2)
    LSEC = 2
44  FOR I = 1 TO N1
        IF LHIGH = I THEN GOTO 18
        IF F#(I) < FS# THEN GOTO 18
        FS# = F#(I)
        LSEC = I
18  NEXT I
    FOR J = 1 TO NX
        X2#(N3, J) = X2#(N2, J) + ALFA# * (X2#(N2, J) - X2#(LHIGH, J))
        X#(J) = X2#(N3, J)
    NEXT J
    IN = N3
    CALL SUMR
    SR#(N3) = SQR(SEQ#)
    IF SR#(N3) < FDIFER# THEN GOTO 82

```



```

INF = N3
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
82 CALL prob(3)
F#(N3) = R#(K9)
IF F#(N3) < F#(LOW) THEN GOTO 84
IF F#(N3) < F#(LSEC) THEN GOTO 92
GOTO 60
92 FOR J = 1 TO NX
  X2#(LHIGH, J) = X2#(N3, J)
NEXT J
SR#(LHIGH) = SR#(N3)
F#(LHIGH) = F#(N3)
GOTO 1000
84 FOR J = 1 TO NX
  X2#(N4, J) = X2#(N2, J) + GAMA# * (X2#(N3, J) - X2#(N2, J))
  X#(J) = X2#(N4, J)
NEXT J
IN = N4
CALL SUMR
SR#(N4) = SQR(SEQ#)
IF SR#(N4) < FDIFER# THEN GOTO 25
INF = N4
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
25 CALL prob(3)
F#(N4) = R#(K9)
IF F#(LOW) < F#(N4) THEN GOTO 92
FOR J = 1 TO NX
  X2#(LHIGH, J) = X2#(N4, J)
NEXT J
F#(LHIGH) = F#(N4)
SR#(LHIGH) = SR#(N4)
GOTO 1000
60 IF F#(N3) > F#(LHIGH) THEN GOTO 64
FOR J = 1 TO NX
  X2#(LHIGH, J) = X2#(N3, J)
NEXT J
64 FOR J = 1 TO NX
  X2#(N4, J) = BETA# * X2#(LHIGH, J) + (1# - BETA#) * X2#(N2, J)
  X#(J) = X2#(N4, J)
NEXT J
IN = N4
CALL SUMR
SR#(N4) = SQR(SEQ#)
IF SR#(N4) < FDIFER# THEN GOTO 67
INF = N4
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80

```

```

67 CALL prob(3)
   F#(N4) = R#(K9)
   IF F#(LHIGH) > F#(N4) THEN GOTO 68
   FOR J = 1 TO NX
     FOR I = 1 TO N1
       X2#(I, J) = .5# * (X2#(I, J) + X2#(LOW, J))
     NEXT I
   NEXT J
   FOR I = 1 TO N1
     FOR J = 1 TO NX
       X#(J) = X2#(I, J)
     NEXT J
     IN = I
     CALL SUMR
     SR#(I) = SQR(SEQ#)
     IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 72
     INF = I
     CALL FEAS
     IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
72  CALL prob(3)
     F#(I) = R#(K9)
   NEXT I
   GOTO 1000
68  FOR J = 1 TO NX
     X2#(LHIGH, J) = X2#(N4, J)
   NEXT J
   SR#(LHIGH) = SR#(N4)
   F#(LHIGH) = F#(N4)
   GOTO 1000
81  CLS
   PRINT " НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, " FDIFER ="; FDIFER#
   PRINT #1, "      НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, "FDIFER ="; FDIFER#
   CALL WRIT
   PRINT " ФИНАЛ"
   PRINT #1, "      ФИНАЛ"
   GOTO 10
80  CLS
   PRINT " НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, " FDIFER ="; FDIFER#
   PRINT #1, "      НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, "FDIFER ="; FDIFER#
   CALL WRIT
   PRINT " НЕТ ФИНАЛА"
   PRINT #1, "      НЕТ ФИНАЛА"
   SOUND 440, 10
   SLEEP 30
   GOTO 10
9999 PRINT "-----STOP-----"
     PRINT #1, "      -STOP-----"
     SOUND 210, 20
     CLOSE
     END

```

```

SUB FEAS
ALFA# = 1#: BETA# = .5#: GAMA# = 2#
XNX = NX
ICONT = 0
LCHEK = 0
ICHEK = 0
250 CALL STAR
  FOR I = 1 TO k1
    FOR J = 1 TO NX
      X#(J) = X1#(I, J)
    NEXT J
    IN = I
    CALL SUMR
  NEXT I
28  SUMH# = SUM#(1)
  INDEX = 1
  FOR I = 2 TO k1
    IF SUM#(I) <= SUMH# THEN GOTO 7
    SUMH# = SUM#(I)
    INDEX = I
7  NEXT I
  SUML# = SUM#(1)
  KOUNT = 1
  FOR I = 2 TO k1
    IF SUML# <= SUM#(I) THEN GOTO 888
    SUML# = SUM#(I)
    KOUNT = I
888 NEXT I
  FOR J = 1 TO NX
    SUM2# = 0#
    FOR I = 1 TO k1
      SUM2# = SUM2# + X1#(I, J)
    NEXT I
    X1#(k2, J) = 1# / XNX * (SUM2# - X1#(INDEX, J))
    X1#(k3, J) = 2# * X1#(k2, J) - X1#(INDEX, J)
    X#(J) = X1#(k3, J)
  NEXT J
  IN = k3
  CALL SUMR
  IF SUM#(k3) < SUML# THEN GOTO 11
  IF INDEX = 1 THEN GOTO 38
  SUMS# = SUM#(1)
  GOTO 39
38  SUMS# = SUM#(2)
39  FOR I = 1 TO k1
    IF (INDEX - I) = 0 THEN GOTO 12
    IF SUM#(I) <= SUMS# THEN GOTO 12
    SUMS# = SUM#(I)
12  NEXT I

```

```

IF SUM#(k3) > SUMS# THEN GOTO 13
GOTO 14
11  FOR J = 1 TO NX
    X1#(k4, J) = X1#(k2, J) + 2# * (X1#(k3, J) - X1#(k2, J))
    X#(J) = X1#(k4, J)
NEXT J
IN = k4
CALL SUMR
IF SUM#(k4) < SUML# THEN GOTO 16
GOTO 14
13  IF SUM#(k3) > SUMH# THEN GOTO 170
    FOR J = 1 TO NX
        X1#(INDEX, J) = X1#(k3, J)
    NEXT J
170  FOR J = 1 TO NX
    X1#(k4, J) = .5# * (X1#(INDEX, J) + X1#(k2, J))
    X#(J) = X1#(k4, J)
NEXT J
IN = k4
CALL SUMR
IF SUMH# > SUM#(k4) THEN GOTO 601
FOR J = 1 TO NX
    FOR I = 1 TO k1
        X1#(I, J) = .5# * (X1#(I, J) + X1#(KOUNT, J))
    NEXT I
NEXT J
FOR I = 1 TO k1
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(I, J)
    NEXT J
    IN = I
    CALL SUMR
NEXT I
555  SUML# = SUM#(1)
    KOUNT = 1
    FOR I = 2 TO k1
        IF SUML# < SUM#(I) THEN GOTO 233
        SUML# = SUM#(I)
        KOUNT = I
233  NEXT I
    SR#(INF) = SQR(SUM#(KOUNT))
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(KOUNT, J)
    NEXT J
    GOTO 26
601  FOR J = 1 TO NX
    X1#(INDEX, J) = X1#(k4, J)
NEXT J
SUM#(INDEX) = SUM#(k4)
GOTO 555

```

```

16  FOR J = 1 TO NX
    X1#(INDEX, J) = X1#(k4, J)
    X#(J) = X1#(INDEX, J)
NEXT J
SUM#(INDEX) = SUM#(k4)
SR#(INF) = SQR(SUM#(k4))
GOTO 26
14  FOR J = 1 TO NX
    X1#(INDEX, J) = X1#(k3, J)
    X#(J) = X1#(INDEX, J)
NEXT J
SUM#(INDEX) = SUM#(k3)
SR#(INF) = SQR(SUM#(k3))
26  ICONT = ICONT + 1
    FOR J = 1 TO NX
        X2#(INF, J) = X#(J)
    NEXT J
    IF ICONT < (2 * k1) THEN GOTO 500
    ICONT = 0
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(k2, J)
    NEXT J
    IN = k2
    CALL SUMR
    DIFER# = 0#
    FOR I = 1 TO k1
        DIFER# = DIFER# + (SUM#(I) - SUM#(k2)) ^ 2
    NEXT I
    DIFER# = 1# / (K7 * XNX) * SQR(DIFER#)
    IF DIFER# > 1E-14 THEN GOTO 500
    IN = k1
    STEP0# = 20# * FDIFER#
    CALL SUMR
    SR#(INF) = SQR(SEQ#)
    FOR J = 1 TO NX
        X1#(k1, J) = X#(J)
    NEXT J
    FOR J = 1 TO NX
        FACTOR# = 1#
        X#(J) = X1#(k1, J) + FACTOR# * STEP0#
        X1#(L9, J) = X#(J)
        IN = L9
        CALL SUMR
        X#(J) = X1#(k1, J) - FACTOR# * STEP0#
        X1#(L5, J) = X#(J)
        IN = L5
        CALL SUMR
56  IF SUM#(L9) < SUM#(k1) THEN GOTO 54
    IF SUM#(L5) < SUM#(k1) THEN GOTO 55
    GOTO 97

```

```

54   X1#(L5, J) = X1#(k1, J)
      SUM#(L5) = SUM#(k1)
      X1#(k1, J) = X1#(L9, J)
      SUM#(k1) = SUM#(L9)
      FACTOR# = FACTOR# + 1#
      X#(J) = X1#(k1, J) + FACTOR# * STEP0#
      IN = L9
      CALL SUMR
      GOTO 56
55   X1#(L9, J) = X1#(k1, J)
      SUM#(L9) = SUM#(k1)
      X1#(k1, J) = X1#(L5, J)
      SUM#(k1) = SUM#(L5)
      FACTOR# = FACTOR# + 1#
      X#(J) = X1#(k1, J) - FACTOR# * STEP0#
      IN = L5
      CALL SUMR
      GOTO 56
97   H#(J) = X1#(L9, J) - X1#(L5, J)
      X1#(L6, J) = X1#(L5, J) + H#(J) * R1A#
      X#(J) = X1#(L6, J)
      IN = L6
      CALL SUMR
      X1#(L7, J) = X1#(L5, J) + H#(J) * R2A#
      X#(J) = X1#(L7, J)
      IN = L7
      CALL SUMR
      IF SUM#(L6) > SUM#(L7) THEN GOTO 688
      X1#(L8, J) = X1#(L5, J) + (1# - R3A#) * H#(J)
      X1#(L5, J) = X1#(L7, J)
      X#(J) = X1#(L8, J)
      IN = L8
      CALL SUMR
      IF SUM#(L8) > SUM#(L6) THEN GOTO 76
      X1#(L5, J) = X1#(L6, J)
      SUM#(L5) = SUM#(L6)
      GOTO 75
76   X1#(L9, J) = X1#(L8, J)
      SUM#(L9) = SUM#(L8)
      GOTO 75
688  X1#(L9, J) = X1#(L6, J)
      X1#(L8, J) = X1#(L5, J) + R3A# * H#(J)
      X#(J) = X1#(L8, J)
      IN = L8
      CALL SUMR
      STEP0# = SIZE#
      SUM#(L9) = SUM#(L6)
      IF SUM#(L7) > SUM#(L8) THEN GOTO 71
      X1#(L5, J) = X1#(L8, J)
      SUM#(L5) = SUM#(L8)

```

```

GOTO 75
71  X1#(L9, J) = X1#(L7, J)
    SUM#(L9) = SUM#(L7)
75  IF ABS(X1#(L9, J) - X1#(L5, J)) > .01# * FDIFER# THEN GOTO 97
    X1#(k1, J) = X1#(L7, J)
    X#(J) = X1#(L7, J)
    SUM#(k1) = SUM#(L5)
    SR#(INF) = SQR(SUM#(k1))
    IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 760
NEXT J
ICHEK = ICHEK + 1
STEP0# = FDIFER#
IF ICHEK <= 2 THEN GOTO 250
FOLD# = 1E-12
PRINT " ПОДПРОГРАММА FEAS"
PRINT #1, "      ПОДПРОГРАММА FEAS"
FOR J = 1 TO NX
  PRINT X#(J)
  PRINT #1, "      "; X#(J)
NEXT J
PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(INF) ="; SR#(INF)
PRINT #1, "      FDIFER ="; FDIFER#, " SR(INF) ="; SR#(INF)
GOTO 46
760 FOR J = 1 TO NX
    X2#(INF, J) = X1#(k1, J)
    X#(J) = X1#(k1, J)
NEXT J
500 IF SR#(INF) > FDIFER# THEN GOTO 28
    IF SR#(INF) > 0# THEN GOTO 35
    CALL prob(3)
    FINT# = R#(K9)
    FOR J = 1 TO NX
      X#(J) = X2#(INF, J)
    NEXT J
    CALL prob(2)
    FOR J = K7 TO K8
      R1#(J) = R#(J)
    NEXT J
    FOR J = 1 TO NX
      X#(J) = X1#(KOUNT, J)
    NEXT J
    CALL prob(2)
    FOR J = K7 TO K8
      R3#(J) = R#(J)
    NEXT J
    FOR J = 1 TO NX
      H#(J) = X1#(KOUNT, J) - X2#(INF, J)
      X#(J) = X2#(INF, J) + .5# * H#(J)
    NEXT J
    CALL prob(2)

```

```

FLG#(1) = 0#
FLG#(2) = 0#
FLG#(3) = 0#
FOR J = K7 TO K8
  IF R3#(J) >= 0 THEN GOTO 404
  FLG#(1) = FLG#(1) + R1#(J) * R1#(J)
  FLG#(2) = FLG#(2) + R#(J) * R#(J)
  FLG#(3) = FLG#(3) + R3#(J) * R3#(J)
404 NEXT J
SR#(INF) = SQR(FLG#(1))
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 35
ALFA1# = FLG#(1) - 2# * FLG#(2) + FLG#(3)
BETA1# = 3# * FLG#(1) - 4# * FLG#(2) + FLG#(3)
RATIO# = BETA1# / (4# * ALFA1#)
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(INF, J) + H#(J) * RATIO#
NEXT J
IN = INF
CALL SUMR
SR#(INF) = SQR(SEQL#)
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 465
FOR I = 1 TO 20
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X#(J) - .05# * H#(J)
  NEXT J
  CALL SUMR
  SR#(INF) = SQR(SEQL#)
  IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 465
NEXT I
465 CALL prob(3)
IF FINT# > R#(K9) THEN GOTO 46
SR#(INF) = 0#
GOTO 35
46 FOR J = 1 TO NX
  X2#(INF, J) = X#(J)
NEXT J
35 FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(INF, J)
NEXT J
END SUB

SUB prob (INQ)
'PRINT "ввод распорного усилия, [Н]"
PP = 100000
'PRINT "ввод геометрических параметров [мм]"
LL = 1520: h1 = .435 * LL: h2 = .333 * LL: cc = .1 * X#(3)
'PRINT "ввод допускаемого напряжения [МПа]"
SIG = 150
'PRINT "ДЛЯ НАЧАЛА ВЫЧИСЛЕНИЙ НАЖМИТЕ F5"
' Расчет напряжений в опасных сечениях

```



```

SIGtr = .362 * PP / .378 / X#(3) ^ 2 + .362 * PP * cc / .00385 / X#(3) ^ 3
SIGst = .0785 * PP * LL / .0112 / X#(1) ^ 3
SIGrg = .004 * PP * LL / .0112 / X#(2) ^ 3 + .885 * PP / .2565 / X#(2) ^ 2
SIGor = .056 * PP * LL / .0112 / X#(1) ^ 3
'PRINT SIGtr; SIGst; SIGrg; SIGor;
IF INQ = 2 THEN GOTO 100
IF INQ = 3 THEN GOTO 200
'ограничений в виде равенств нет
GOTO 300
'ограничения в виде неравенств
100 R#(1) = 1 - SIGtr / SIG
R#(2) = 1 - SIGst / SIG
R#(3) = 1 - SIGrg / SIG
R#(4) = 1 - SIGor / SIG
R#(5) = X#(1) / 100 - 1
R#(6) = 1 - X#(1) / 200
R#(7) = X#(2) / 100 - 1
R#(8) = 1 - X#(2) / 200
R#(9) = X#(3) / 100 - 1
R#(10) = 1 - X#(3) / 200
GOTO 300
'целевая функция
200 R#(11) = 2 * .2565 * X#(1) ^ 2 * (h1 + h2) + .2565 * X#(2) ^ 2 * L + .378 * X#(3) ^ 2 * L
300 END SUB

```

```

SUB STAR
VN = NX
STEP1# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) + VN - 1#)
STEP2# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) - 1#)
FOR J = 1 TO NX
a#(1, J) = 0#
NEXT J
FOR I = 2 TO k1
FOR J = 1 TO NX
a#(I, J) = STEP2#
NEXT J
L = I - 1
a#(I, L) = STEP1#
NEXT I
FOR I = 1 TO k1
FOR J = 1 TO NX
X1#(I, J) = X#(J) + a#(I, J)
NEXT J
NEXT I
END SUB

```

```

SUB SUMR
SUM#(IN) = 0#
CALL prob(2)
SEQL# = 0#

```

```

IF NIC = 0 THEN GOTO 444
FOR J = K7 TO K8
  IF R#(J) >= 0# THEN GOTO 111
  SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
111 NEXT J
444 IF NC = 0 THEN GOTO 313
  CALL prob(1)
  FOR J = 1 TO NC
    SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
  NEXT J
313 SUM#(IN) = SEQL#
  END SUB

SUB WRIT
CALL prob(3)
PRINT " ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ (ОБЪЕМ КОНСТРУКЦИИ), V= "; R#(K9) / 1E+09; "[м^3]"
PRINT #1, "      ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = "; R#(K9) / 1E+09; "[м^3]"
PRINT " ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
PRINT #1, "ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
FOR J = 1 TO NX
  IF J = 1 THEN PRINT ", X1": GOTO 22
  IF J = 2 THEN PRINT ", X2": GOTO 22
  IF J = 3 THEN PRINT ", X3"
22 PRINT " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[мм]"
  PRINT #1, "      ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[мм]"
NEXT J
IF NC = 0 THEN GOTO 6
CALL prob(1)
FOR J = 1 TO NC
  PRINT " H("; J; ") : "; R#(J)
  PRINT #1, "      H("; J; ") : "; R#(J)
NEXT J
6 IF NIC = 0 THEN GOTO 503
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO k6
  PRINT " G("; J; ") : "; R#(J)
  PRINT #1, "      G("; J; ") : "; R#(J)
NEXT J
503 END SUB

```

Результаты расчета программы 7

Расчет станины валцов промышленных

<<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>

ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: 3

ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : 0

2).НЕРАВЕНСТВ: 10

ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: 5

ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: .001

НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

X(1) = 80

X(2) = 80

X(3) = 80

FDIFER = 10 SR(N1) = 15.65090317970266

ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = 3.832676489601564D-03 [м^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 80 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 80 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 80 [мм]

G(1): -7.919474283854167D-02

G(2): -12.87183919270833

G(3): -6.625071207682291D-02

G(4): -8.895834147135417

G(5): -.2

G(6): .6

G(7): -.2

G(8): .6

G(9): -.2

G(10): .6

SR(INF) = 8.319824225961794

НОМЕР СЧЕТА: 1 FDIFER = 10

ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = 5.576596715391017D-03 [м^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 96.49915822768516 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 90.48875058759963 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 82.0034692133618 [мм]

G(1): -2.710611979166667D-02

G(2): -6.903754069010417

G(3): .2306453959147135

G(4): -4.638346761067709

G(5): -3.500841772314842D-02

G(6): .5175042088615742

G(7): -9.511249412400374D-02

G(8): .5475562470620019

G(9): -.179965307866382

G(10): .589982653933191

НОМЕР СЧЕТА: 11 FDIFER = 5.373434910355122D-04

ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = 5.211638984271601D-02 [м³]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 192.174616889685 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 158.3303924353074 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 188.7423924691182 [мм]

G(1): .6657202657063802

G(2): -7.277425130208334D-04

G(3): .4829780578613281

G(4): .2861050923665365

G(5): .9217461688968498

G(6): 3.912691555157508D-02

G(7): .0533039243530736

G(8): .4733480378234632

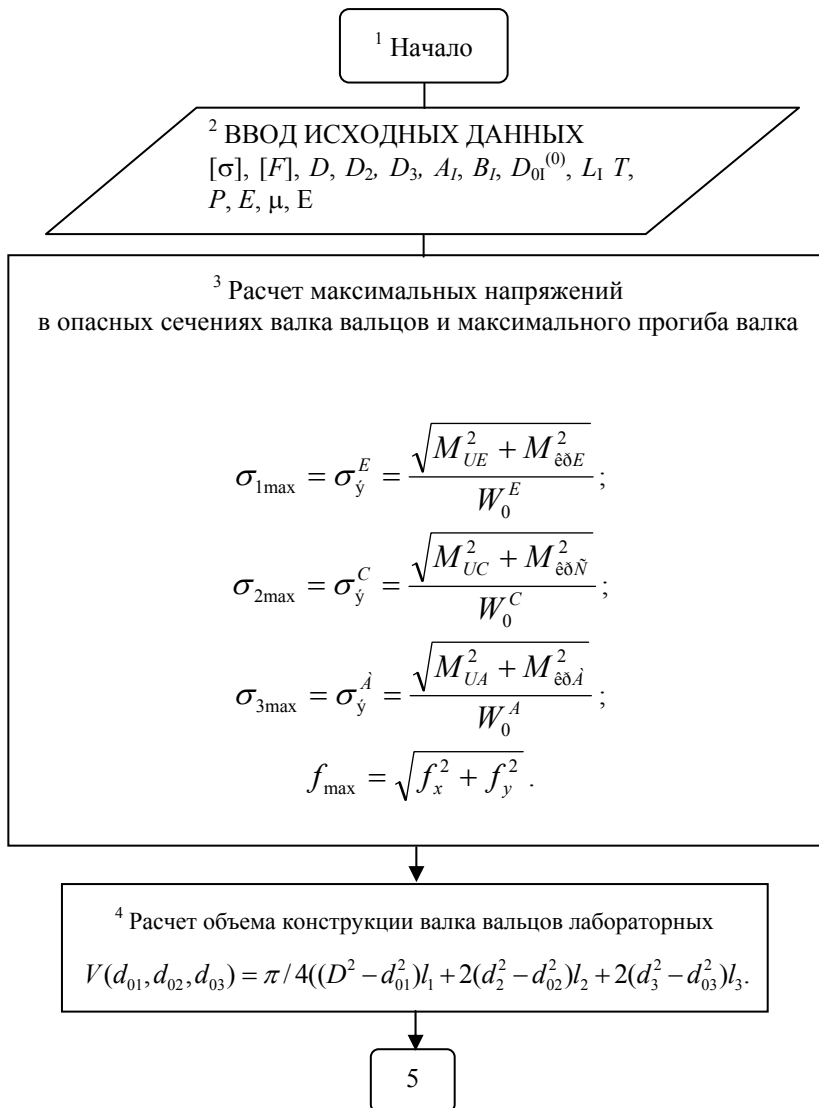
G(9): .4374239246911819

G(10): .2812880376544091

ФИНАЛ

-STOP-----

**ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА МИНИМИЗАЦИИ
МАССЫ ВАЛКА ВАЛЬЦОВ ЛАБОРАТОРНЫХ**



**РИС. Е. БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ ВАЛКА ВАЛЬЦОВ
ЛАБОРАТОРНЫХ**

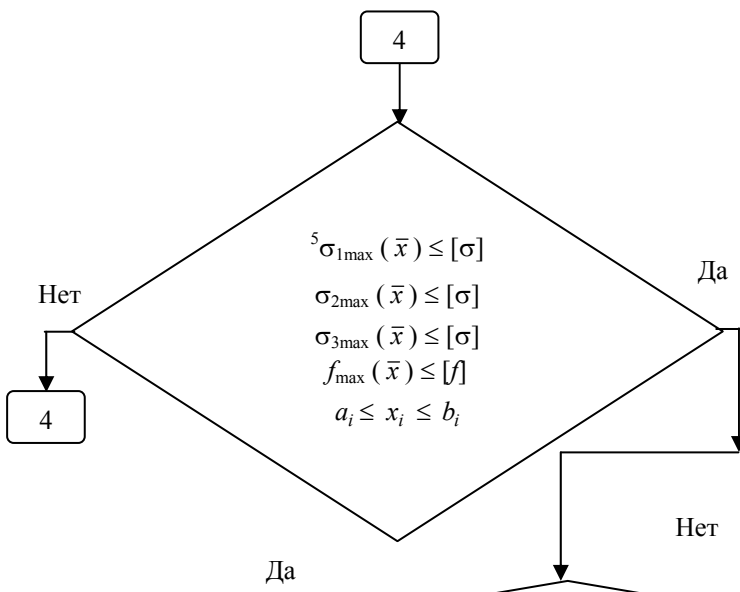


Рис. Е. Окончание

Блок 1. Начало

Блок 2. Ввод исходных данных: $[\sigma]$, $[F]$, D , D_2 , D_3 , A_1 , B_1 , $D_{01}^{(0)}$, L_1 , T , P , E , μ , E .

Блок 3. Расчет максимальных напряжений в сечениях валка E , C , A и максимального прогиба: $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$, $\sigma_{3\max}$, f_{\max} .

Блок 4. Расчет объема конструкции валка вальцов лабораторных $V(\bar{x})$.

Блок 5. Проверка выполнения условий прочности, прогиба валка и граничных условий варьируемых параметров.

Блок 6. Проверка минимального значения объема конструкции валка.

Блок 7. Вывод результатов процесса оптимизации: $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$, $\sigma_{3\max}$, f_{\max} , $V(\bar{x})$, x_i

Блок 8. Конец.

Идентификаторы к программе 8

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1. Допускаемое напряжение материала валка при изгибе, МПа	$[\sigma]$	SIG
2. Плотность материала валка, кг/мм ³	ρ	RRO
3. Распорное усилие, действующее на валок, Н	P	PP
4. Наименьшие размеры сечений станины, м	a_i	
5. Наибольшие размеры сечений станины, м	b_i	
6. Максимальное напряжение в сечении E , Па	$\sigma_{1\max}$	SIGb
7. Максимальное напряжение в сечении C , Па	$\sigma_{2\max}$	SIGz
8. Максимальное напряжение в сечении A , Па	$\sigma_{3\max}$	SIGp

9. Максимальный прогиб валка, мм	f_{\max}	fmax
10. Варьируемые параметры	d a i	x#(i) _i
11. Допускаемый прогиб валка, мм	[f]	fdop
12. Объем конструкции валка, мм ³	$V(x)$	R#(11)
13. Минимальный диаметр осевого отверстия валка, мм	d_0	dd0
14. Технологическая мощность, Вт	N	NTex
15. Частота вращения валка, об/мин	n	nobor
16. Модуль упругости материала валка, МПа	E	EE
17. Диаметр ведущей фрикционной шестерни, мм	D_1	D1

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
18. Диаметр зубчатого колеса ведущего вала, мм	D_2	D2
19. Диаметр ведомой фрикционной шестерни, мм	D_3	D3
20. Диаметр рабочей части вала, мм	D	DD
21. Диаметр цапфы вала, мм	d_2	dd2
22. Диаметр приводной части вала, мм	d_3	dd3
23. Длина рабочей части вала, мм	l_1	ll1
24. Длина цапфы вала, мм	l_2	ll2
25. Длина приводной части вала, мм	l_3	ll3

Программа 8

***** ВалЛОПТ *****

* Минимизация целевой функции методом скользящего допуска *

* Расчет *

```

DECLARE SUB FEAS ()
DECLARE SUB STAR ()
DECLARE SUB WRIT ()
DECLARE SUB SUMR ()
DECLARE SUB prob (INQ!)
DIM SHARED X#(100), X1#(50, 50), X2#(50, 50), R#(100), R1#(100), R2#(100), R3#(100), SUM#(50),
F#(50), SR#(50), ROLD#(100), H#(50), FLG#(10), a#(50, 50)
COMMON SHARED kik, NX, NC, NIC, STEP0#, ALFA#, BETA#, GAMA#, IN, INF, FDIFER#,
SEQ#L#, k1, k2, k3, k4, k5, k6, K7, K8, K9, FOLD#, L5, L6, L7, L8, L9, R1A#, R2A#, R3A#
OPEN "ВалЛОПТ.res" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, " Минимизация объема конструкции вала вальцев лабораторных "
PRINT " Минимизация объема конструкции вала вальцев лабораторных"
PRINT "-----"
PRINT #1, "-----"
FDIFER# = 1#
NX = 3      'общее число переменных
NC = 0      'общее число ограничений в виде равенств
NIC = 10    'общее число ограничений в виде неравенств
SIZE# = 3   'опред. размер деформ. многогранника
CONVER# = .001# 'используется для окончания поиска

```



```

ALFA# = 1#
БЕТА# = .5#
ГАМА# = .95#
10 'PRINT "введите начальные значения варьируемых параметров, [мм]"
STEP0# = SIZE#
X#(1) = 40#      'координаты
X#(2) = 40#      'стартовой
X#(3) = 40#      'точки
'PRINT "ДЛЯ ВВОДА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НАЖМИТЕ F2 и выберите PROB"
IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 9999
PRINT " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT #1, "      <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT "-----"
PRINT #1, "      -----"
PRINT " ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: "; NX
PRINT #1, "      ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: "; NX
PRINT " ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : "; NC
PRINT #1, "      ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : "; NC
PRINT "      2).НЕРАВЕНСТВ: "; NIC
PRINT #1, "      2).НЕРАВЕНСТВ: "; NIC
PRINT " ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: "; SIZE#
PRINT #1, "      ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: "; SIZE#
PRINT " ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: "; CONVER#
PRINT #1, "      ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: "; CONVER#
k1 = NX + 1
k2 = NX + 2
k3 = NX + 3
k4 = NX + 4
k5 = NX + 5
k6 = NC + NIC
K7 = NC + 1
K8 = NC + NIC
K9 = K8 + 1
N = NX - NC
N1 = N + 1
IF N1 >= 3 THEN GOTO 50
N1 = 3
N = 2
50 N2 = N + 2
N3 = N + 3
N4 = N + 4
N5 = N + 5
N6 = N + 6
N7 = N + 7
N8 = N + 8
XN = N
XNX = NX
XN1 = N1
R1A# = .5# * (SQR(5#) - 1#)

```

```

R2A# = R1A# * R1A#
R3A# = R2A# * R1A#
L5 = NX + 5
L6 = NX + 6
L7 = NX + 7
L8 = NX + 8
L9 = NX + 9
ICONT = 1
NCONT = 1
PRINT " НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"
PRINT #1, "      НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"
FOR J = 1 TO NX
  PRINT " X("; J; ") = "; X#(J)
  PRINT #1, "      X("; J; ") = "; X#(J)
NEXT J
FDIFER# = 2# * (NC + 1) * STEP0#
FOLD# = FDIFER#
IN = N1
CALL SUMR
SR#(N1) = SQR(SEQ#)
PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
PRINT #1, "      FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
IF SR#(N1) < FDIFER# THEN GOTO 341
CALL WRIT
INF = N1
STEP0# = .05# * FDIFER#
CALL FEAS
PRINT " SR(INF) ="; SR#(INF)
PRINT #1, "      SR(INF) ="; SR#(INF)
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
341 PRINT "*****"
PRINT #1, "*****"
PRINT " HOMEР СЧЕТА:"; ICONT, " FDIFER ="; FDIFER#
PRINT #1, "      HOMEР СЧЕТА:"; ICONT, "FDIFER ="; FDIFER#
CALL WRIT
FTER# = R#(K9)
STEP1# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) + XNX - 1#) / (XNX * SQR(2#))
STEP2# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) - 1#) / (XNX * SQR(2#))
ETA# = (STEP1# + (XNX - 1#) * STEP2#) / (XNX + 1#)
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X#(J) - ETA#
NEXT J
CALL STAR
FOR I = 1 TO N1
  FOR J = 1 TO NX
    X2#(I, J) = X1#(I, J)
  NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO N1
  IN = I

```

```

FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(I, J)
NEXT J
CALL SUMR
SR#(I) = SQR(SEQL#)
IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 8
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
8  CALL prob(3)
  F#(I) = R#(K9)
NEXT I
1000
STEP0# = .05# * FDIFER#
  ICONT = ICONT + 1
  FH# = F#(1)
  LHIGH = 1
  FOR I = 2 TO N1
    IF F#(I) < FH# THEN GOTO 166
    FH# = F#(I)
    LHIGH = I
166 NEXT I
41  FL# = F#(1)
  LOW = 1
  FOR I = 2 TO N1
    IF FL# < F#(I) THEN GOTO 177
    FL# = F#(I)
    LOW = I
177 NEXT I
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(LOW, J)
  NEXT J
  IN = LOW
  CALL SUMR
  SR#(LOW) = SQR(SEQL#)
  IF SR#(LOW) < FDIFER# THEN GOTO 87
  INF = LOW
  CALL FEAS
  IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
  CALL prob(3)
  F#(LOW) = R#(K9)
  GOTO 41
87  FOR J = 1 TO NX
    SUM2# = 0#
    FOR I = 1 TO N1
      SUM2# = SUM2# + X2#(I, J)
    NEXT I
    X2#(N2, J) = 1# / XN * (SUM2# - X2#(LHIGH, J))
  NEXT J
  SUM2# = 0#
  FOR I = 1 TO N1

```

```

FOR J = 1 TO NX
  SUM2# = SUM2# + (X2#(I, J) - X2#(N2, J)) ^ 2
NEXT J
NEXT I
FDIFER# = (NC + 1) / XN1 * SQR(SUM2#)
IF FDIFER# < FOLD# THEN GOTO 98
FDIFER# = FOLD#
GOTO 198
98  FOLD# = FDIFER#
198  FTER# = F#(LOW)
    PRINT "-----", FDIFER#
    NCONT = NCONT + 1
    IF NCONT < 4 * N1 THEN GOTO 37
    IF ICONT < 1500 THEN GOTO 337
    FOLD# = .5# * FOLD#
337  NCONT = 0
    PRINT "*****"
    PRINT #1, "*****"
    PRINT " HOMEPC4ETA: "; ICONT, " FDIFER = "; FDIFER#
    PRINT #1, "      HOMEPC4ETA: "; ICONT, "FDIFER = "; FDIFER#
    CALL WRIT
37  IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 81
    IF LHIGH = 1 THEN GOTO 43
    FS# = F#(1)
    LSEC = 1
    GOTO 44
43  FS# = F#(2)
    LSEC = 2
44  FOR I = 1 TO N1
    IF LHIGH = I THEN GOTO 18
    IF F#(I) < FS# THEN GOTO 18
    FS# = F#(I)
    LSEC = I
18  NEXT I
    FOR J = 1 TO NX
      X2#(N3, J) = X2#(N2, J) + ALFA# * (X2#(N2, J) - X2#(LHIGH, J))
      X#(J) = X2#(N3, J)
    NEXT J
    IN = N3
    CALL SUMR
    SR#(N3) = SQR(SEQL#)
    IF SR#(N3) < FDIFER# THEN GOTO 82
    INF = N3
    CALL FEAS
    IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
82  CALL prob(3)
    F#(N3) = R#(K9)
    IF F#(N3) < F#(LOW) THEN GOTO 84
    IF F#(N3) < F#(LSEC) THEN GOTO 92
    GOTO 60

```

```

92  FOR J = 1 TO NX
    X2#(LHIGH, J) = X2#(N3, J)
NEXT J
SR#(LHIGH) = SR#(N3)
F#(LHIGH) = F#(N3)
GOTO 1000
84  FOR J = 1 TO NX
    X2#(N4, J) = X2#(N2, J) + GAMA# * (X2#(N3, J) - X2#(N2, J))
    X#(J) = X2#(N4, J)
NEXT J
IN = N4
CALL SUMR
SR#(N4) = SQR(SEQ#)
IF SR#(N4) < FDIFER# THEN GOTO 25
INF = N4
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
25  CALL prob(3)
F#(N4) = R#(K9)
IF F#(LOW) < F#(N4) THEN GOTO 92
FOR J = 1 TO NX
    X2#(LHIGH, J) = X2#(N4, J)
NEXT J
F#(LHIGH) = F#(N4)
SR#(LHIGH) = SR#(N4)
GOTO 1000
60  IF F#(N3) > F#(LHIGH) THEN GOTO 64
FOR J = 1 TO NX
    X2#(LHIGH, J) = X2#(N3, J)
NEXT J
64  FOR J = 1 TO NX
    X2#(N4, J) = BETA# * X2#(LHIGH, J) + (1# - BETA#) * X2#(N2, J)
    X#(J) = X2#(N4, J)
NEXT J
IN = N4
CALL SUMR
SR#(N4) = SQR(SEQ#)
IF SR#(N4) < FDIFER# THEN GOTO 67
INF = N4
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
67  CALL prob(3)
F#(N4) = R#(K9)
IF F#(LHIGH) > F#(N4) THEN GOTO 68
FOR J = 1 TO NX
    FOR I = 1 TO N1
        X2#(I, J) = .5# * (X2#(I, J) + X2#(LOW, J))
    NEXT I
NEXT J
FOR I = 1 TO N1

```

```

FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(I, J)
NEXT J
IN = I
CALL SUMR
SR#(I) = SQR(SEQ#)
IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 72
INF = I
CALL FEAS
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
72  CALL prob(3)
    F#(I) = R#(K9)
NEXT I
GOTO 1000
68  FOR J = 1 TO NX
    X2#(LHIGH, J) = X2#(N4, J)
NEXT J
SR#(LHIGH) = SR#(N4)
F#(LHIGH) = F#(N4)
GOTO 1000
81  CLS
PRINT "*****"
PRINT #1, "*****"
PRINT " НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, " FDIFER ="; FDIFER#
PRINT #1, "      НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, "FDIFER ="; FDIFER#
CALL WRIT
PRINT " ФИНАЛ"
PRINT #1, "      ФИНАЛ"
GOTO 10
80  CLS
PRINT "*****"
PRINT #1, "*****"
PRINT " НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, " FDIFER ="; FDIFER#
PRINT #1, "      НОМЕР СЧЕТА:"; ICONT, "FDIFER ="; FDIFER#
CALL WRIT
PRINT " НЕТ ФИНАЛА"
PRINT #1, "      НЕТ ФИНАЛА"
SOUND 440, 10
SLEEP 30
GOTO 10
9999 PRINT "-----STOP-----"
PRINT #1, "      -----STOP-----"
SOUND 210, 20
CLOSE
END

SUB FEAS
ALFA# = 1#: BETA# = .5#: GAMA# = 2#
XNX = NX
ICONT = 0

```

```

LCHEK = 0
ICHEK = 0
250 CALL STAR
   FOR I = 1 TO k1
     FOR J = 1 TO NX
       X#(J) = X1#(I, J)
     NEXT J
     IN = I
     CALL SUMR
   NEXT I
28  SUMH# = SUM#(1)
   INDEX = 1
   FOR I = 2 TO k1
     IF SUM#(I) <= SUMH# THEN GOTO 7
     SUMH# = SUM#(I)
     INDEX = I
7   NEXT I
   SUML# = SUM#(1)
   KOUNT = 1
   FOR I = 2 TO k1
     IF SUML# <= SUM#(I) THEN GOTO 888
     SUML# = SUM#(I)
     KOUNT = I
888 NEXT I
   FOR J = 1 TO NX
     SUM2# = 0#
     FOR I = 1 TO k1
       SUM2# = SUM2# + X1#(I, J)
     NEXT I
     X1#(k2, J) = 1# / XNX * (SUM2# - X1#(INDEX, J))
     X1#(k3, J) = 2# * X1#(k2, J) - X1#(INDEX, J)
     X#(J) = X1#(k3, J)
   NEXT J
   IN = k3
   CALL SUMR
   IF SUM#(k3) < SUML# THEN GOTO 11
   IF INDEX = 1 THEN GOTO 38
   SUMS# = SUM#(1)
   GOTO 39
38  SUMS# = SUM#(2)
39  FOR I = 1 TO k1
     IF (INDEX - I) = 0 THEN GOTO 12
     IF SUM#(I) <= SUMS# THEN GOTO 12
     SUMS# = SUM#(I)
12  NEXT I
   IF SUM#(k3) > SUMS# THEN GOTO 13
   GOTO 14
11  FOR J = 1 TO NX
     X1#(k4, J) = X1#(k2, J) + 2# * (X1#(k3, J) - X1#(k2, J))
     X#(J) = X1#(k4, J)

```

```

NEXT J
IN = k4
CALL SUMR
IF SUM#(k4) < SUML# THEN GOTO 16
GOTO 14
13  IF SUM#(k3) > SUMH# THEN GOTO 170
    FOR J = 1 TO NX
        X1#(INDEX, J) = X1#(k3, J)
    NEXT J
170  FOR J = 1 TO NX
        X1#(k4, J) = .5# * (X1#(INDEX, J) + X1#(k2, J))
        X#(J) = X1#(k4, J)
    NEXT J
    IN = k4
    CALL SUMR
    IF SUMH# > SUM#(k4) THEN GOTO 601
    FOR J = 1 TO NX
        FOR I = 1 TO k1
            X1#(I, J) = .5# * (X1#(I, J) + X1#(KOUNT, J))
        NEXT I
    NEXT J
    FOR I = 1 TO k1
        FOR J = 1 TO NX
            X#(J) = X1#(I, J)
        NEXT J
        IN = I
        CALL SUMR
    NEXT I
555  SUML# = SUM#(1)
    KOUNT = 1
    FOR I = 2 TO k1
        IF SUML# < SUM#(I) THEN GOTO 233
        SUML# = SUM#(I)
        KOUNT = I
233  NEXT I
    SR#(INF) = SQR(SUM#(KOUNT))
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(KOUNT, J)
    NEXT J
    GOTO 26
601  FOR J = 1 TO NX
        X1#(INDEX, J) = X1#(k4, J)
    NEXT J
    SUM#(INDEX) = SUM#(k4)
    GOTO 555
16   FOR J = 1 TO NX
        X1#(INDEX, J) = X1#(k4, J)
        X#(J) = X1#(INDEX, J)
    NEXT J
    SUM#(INDEX) = SUM#(k4)

```



```

SR#(INF) = SQR(SUM#(k4))
GOTO 26
14  FOR J = 1 TO NX
    X1#(INDEX, J) = X1#(k3, J)
    X#(J) = X1#(INDEX, J)
NEXT J
SUM#(INDEX) = SUM#(k3)
SR#(INF) = SQR(SUM#(k3))
26  ICONT = ICONT + 1
    FOR J = 1 TO NX
        X2#(INF, J) = X#(J)
    NEXT J
    IF ICONT < (2 * k1) THEN GOTO 500
    ICONT = 0
    FOR J = 1 TO NX
        X#(J) = X1#(k2, J)
    NEXT J
    IN = k2
    CALL SUMR
    DIFER# = 0#
    FOR I = 1 TO k1
        DIFER# = DIFER# + (SUM#(I) - SUM#(k2)) ^ 2
    NEXT I
    DIFER# = 1# / (K7 * XNX) * SQR(DIFER#)
    IF DIFER# > 1E-14 THEN GOTO 500
    IN = k1
    STEP0# = 20# * FDIFER#
    CALL SUMR
    SR#(INF) = SQR(SEQL#)
    FOR J = 1 TO NX
        X1#(k1, J) = X#(J)
    NEXT J
    FOR J = 1 TO NX
        FACTOR# = 1#
        X#(J) = X1#(k1, J) + FACTOR# * STEP0#
        X1#(L9, J) = X#(J)
        IN = L9
        CALL SUMR
        X#(J) = X1#(k1, J) - FACTOR# * STEP0#
        X1#(L5, J) = X#(J)
        IN = L5
        CALL SUMR
56  IF SUM#(L9) < SUM#(k1) THEN GOTO 54
    IF SUM#(L5) < SUM#(k1) THEN GOTO 55
    GOTO 97
54  X1#(L5, J) = X1#(k1, J)
    SUM#(L5) = SUM#(k1)
    X1#(k1, J) = X1#(L9, J)
    SUM#(k1) = SUM#(L9)
    FACTOR# = FACTOR# + 1#

```

```

X#(J) = X1#(k1, J) + FACTOR# * STEP0#
IN = L9
CALL SUMR
GOTO 56
55  X1#(L9, J) = X1#(k1, J)
SUM#(L9) = SUM#(k1)
X1#(k1, J) = X1#(L5, J)
SUM#(k1) = SUM#(L5)
FACTOR# = FACTOR# + 1#
X#(J) = X1#(k1, J) - FACTOR# * STEP0#
IN = L5
CALL SUMR
GOTO 56
97  H#(J) = X1#(L9, J) - X1#(L5, J)
X1#(L6, J) = X1#(L5, J) + H#(J) * R1A#
X#(J) = X1#(L6, J)
IN = L6
CALL SUMR
X1#(L7, J) = X1#(L5, J) + H#(J) * R2A#
X#(J) = X1#(L7, J)
IN = L7
CALL SUMR
IF SUM#(L6) > SUM#(L7) THEN GOTO 688
X1#(L8, J) = X1#(L5, J) + (1# - R3A#) * H#(J)
X1#(L5, J) = X1#(L7, J)
X#(J) = X1#(L8, J)
IN = L8
CALL SUMR
IF SUM#(L8) > SUM#(L6) THEN GOTO 76
X1#(L5, J) = X1#(L6, J)
SUM#(L5) = SUM#(L6)
GOTO 75
76  X1#(L9, J) = X1#(L8, J)
SUM#(L9) = SUM#(L8)
GOTO 75
688 X1#(L9, J) = X1#(L6, J)
X1#(L8, J) = X1#(L5, J) + R3A# * H#(J)
X#(J) = X1#(L8, J)
IN = L8
CALL SUMR
STEP0# = SIZE#
SUM#(L9) = SUM#(L6)
IF SUM#(L7) > SUM#(L8) THEN GOTO 71
X1#(L5, J) = X1#(L8, J)
SUM#(L5) = SUM#(L8)
GOTO 75
71  X1#(L9, J) = X1#(L7, J)
SUM#(L9) = SUM#(L7)
75  IF ABS(X1#(L9, J) - X1#(L5, J)) > .01# * FDIFER# THEN GOTO 97
X1#(k1, J) = X1#(L7, J)

```

```

X#(J) = X1#(L7, J)
SUM#(k1) = SUM#(L5)
SR#(INF) = SQR(SUM#(k1))
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 760
NEXT J
ICHEK = ICHEK + 1
STEP0# = FDIFER#
IF ICHEK <= 2 THEN GOTO 250
FOLD# = 1E-12
PRINT " ПОДПРОГРАММА FEAS"
PRINT #1, "      ПОДПРОГРАММА FEAS"
FOR J = 1 TO NX
  PRINT X#(J)
  PRINT #1, "      "; X#(J)
NEXT J
PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(INF) ="; SR#(INF)
PRINT #1, "      FDIFER ="; FDIFER#, " SR(INF) ="; SR#(INF)
GOTO 46
760 FOR J = 1 TO NX
  X2#(INF, J) = X1#(k1, J)
  X#(J) = X1#(k1, J)
NEXT J
500 IF SR#(INF) > FDIFER# THEN GOTO 28
IF SR#(INF) > 0# THEN GOTO 35
CALL prob(3)
FINT# = R#(K9)
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(INF, J)
NEXT J
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO K8
  R1#(J) = R#(J)
NEXT J
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X1#(KOUNT, J)
NEXT J
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO K8
  R3#(J) = R#(J)
NEXT J
FOR J = 1 TO NX
  H#(J) = X1#(KOUNT, J) - X2#(INF, J)
  X#(J) = X2#(INF, J) + .5# * H#(J)
NEXT J
CALL prob(2)
FLG#(1) = 0#
FLG#(2) = 0#
FLG#(3) = 0#
FOR J = K7 TO K8

```

```

IF R3#(J) >= 0 THEN GOTO 404
FLG#(1) = FLG#(1) + R1#(J) * R1#(J)
FLG#(2) = FLG#(2) + R#(J) * R#(J)
FLG#(3) = FLG#(3) + R3#(J) * R3#(J)
404 NEXT J
SR#(INF) = SQR(FLG#(1))
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 35
ALFA1# = FLG#(1) - 2# * FLG#(2) + FLG#(3)
BETA1# = 3# * FLG#(1) - 4# * FLG#(2) + FLG#(3)
RATIO# = BETA1# / (4# * ALFA1#)
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(INF, J) + H#(J) * RATIO#
NEXT J
IN = INF
CALL SUMR
SR#(INF) = SQR(SEQL#)
IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 465
FOR I = 1 TO 20
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X#(J) - .05# * H#(J)
  NEXT J
  CALL SUMR
  SR#(INF) = SQR(SEQL#)
  IF SR#(INF) < FDIFER# THEN GOTO 465
NEXT I
465 CALL prob(3)
IF FINT# > R#(K9) THEN GOTO 46
SR#(INF) = 0#
GOTO 35
46 FOR J = 1 TO NX
  X2#(INF, J) = X#(J)
NEXT J
35 FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X2#(INF, J)
NEXT J
END SUB

```

SUB prob (INQ)

```

""ввод распорного усилия [Н]"
PP = 80000
""ввод геометрических параметров, [мм]"
D1 = 150: D2 = 500: D3 = 130: DD = 160: dd2 = 95: dd3 = 80
l1 = 320: l2 = 110: l3 = 115
""ввод минимального диаметра осевого отверстия, [мм]"
dd0 = 40
""ввод технологической мощности, [Вт]"
NТех = 5000
""ввод частоты вращения, [об/мин]"
nобор = 30
""ввод допускаемого прогиба валка, [мм]"

```

```

fdop = .25
""ввод допускаемого напряжения, [МПа]"
SIG = 150
""ввод модуля упругости материала валка, [МПа]"
EE = 200000
""ввод плотности материала валка, [Н/мм^3]"
RRO = 78500 / 1000000000
' "ДЛЯ НАЧАЛА ВЫЧИСЛЕНИЙ НАЖМИТЕ F5"
  gg1 = 3.14 / 4 * (DD ^ 2 - X#(1) ^ 2) * l11 * RRO
  gg2 = 3.14 / 4 * (dd2 ^ 2 - X#(2) ^ 2) * l12 * RRO
  qg = gg1 / l11 + 2 * gg2 / l12
  qp = PP / l11
  Fr = D1 / D3: Mkr = 9550 * NTex / nobor
  Mkr2 = Mkr / (1 + Fr): Mkr1 = Mkr2 * Fr
  'PRINT "qp="; qp; "qg="; qg; "Fr="; Fr; "Mkr="; Mkr; "Mkr1="; Mkr1; "Mkr2="; Mkr2
  'PRINT #1, "qp="; qp; "Fr="; Fr; "Mkr="; Mkr; "Mkr1="; Mkr1; "Mkr2="; Mkr2
  PP1 = 2 * Mkr1 / D1: PP2 = 2 * Mkr2 / D2
  RR1 = PP1 * TAN(20 * 3.14 / 180): RR2 = PP2 * TAN(20 * 3.14 / 180)
  Ha = (qp * l11 * (.5 * l11 + l12) + PP1 * (l11 + 2 * l12 + l13) - PP2 * l13) / (2 * l12 + l11)
  Hb = (qp * l11 * (.5 * l11 + l12) + PP2 * (l11 + 2 * l12 + l13) - PP1 * l13) / (2 * l12 + l11)
  Va = (qg * l11 * (.5 * l11 + l12) - RR2 * l13 + RR1 * (l11 + 2 * l12 + l13)) / (2 * l12 + l11)
  Vb = (qg * l11 * (.5 * l11 + l12) - RR1 * l13 + RR2 * (l11 + 2 * l12 + l13)) / (2 * l12 + l11)
  'PRINT "PP1="; PP1; "PP2="; PP2; "Ha="; Ha; "Hb="; Hb; "Va="; Va; "Vb="; Vb; "l11="; l11
  'PRINT #1, "PP1="; PP1; "PP2="; PP2; "Ha="; Ha; "Hb="; Hb; "Va="; Va; "Vb="; Vb; "l11="; l11; "l12=";
l12; "l13="; l13
  Mxa = -RR1 * l13: Mya = -PP1 * l13
  Mxc = -RR1 * (l12 + l13) + Va * l12
  Myc = -PP1 * (l12 + l13) + Ha * l12
  Mxe = -RR1 * (l12 + l13 + .5 * l11) + Va * (l12 + .5 * l11)
  Mye = -PP1 * (l12 + l13 + (Ha - PP1) / qp) + Ha * (l12 + (Ha - PP1) / qp) - qp * .5 * ((Ha - PP1) / qp) ^ .5
  Mua = (Mxa ^ 2 + Mya ^ 2) ^ .5: Muc = (Mxc ^ 2 + Myc ^ 2) ^ .5: Mue = (Mxe ^ 2 + Mye ^ 2) ^ .5:
  'PRINT "Mxa="; Mxa; "Mea="; Mya; "Mxc="; Mxc; "Mxe="; Mxe; "Mye="; Mye; "Mua="; Mua; "Mue=";
Mue
  'PRINT #1, "Mxa="; Mxa; "Mea="; Mya; "Mxc="; Mxc; "Mxe="; Mxe; "Mye="; Mye; "Mua="; Mua;
"Mue="; Mue
  Mkrс = Mkr2: Mkra = Mkr2: Mkre = (Mkr + Mkr2) / 2
  IF X#(1) < 0 THEN X#(1) = dd0
  IF X#(2) < 0 THEN X#(2) = dd0
  IF X#(3) < 0 THEN X#(3) = dd0
  W0e = 3.14 * DD ^ 3 / 32 * (1 - (X#(1) / DD) ^ 4)
  W0c = 3.14 * dd2 ^ 3 / 32 * (1 - (X#(2) / dd2) ^ 4)
  W0a = 3.14 * dd3 ^ 3 / 32 * (1 - (X#(3) / dd3) ^ 4)
  SIGb = (Mue ^ 2 + Mkre ^ 2) ^ .5 / W0e
  SIGz = (Muc ^ 2 + Mkrс ^ 2) ^ .5 / W0c
  SIGp = (Mua ^ 2 + Mkra ^ 2) ^ .5 / W0a
  'расчет максимального прогиба валка
  JJ1 = 3.14 * DD ^ 4 / 64 * (1 - (X#(1) / DD) ^ 4)
  JJ2 = 3.14 * dd2 ^ 4 / 64 * (1 - (X#(2) / dd2) ^ 4)
  JJ3 = 3.14 * dd3 ^ 4 / 64 * (1 - (X#(3) / dd3) ^ 4)
  fxmax1 = (Ha + Hb) * (.5 * l12 * l11 * (.5 * l12 + 1 / 8 * l11) + 1 / 8 * l11 ^ 2 * (.5 * l12 + 1 / 6 * l11))

```

```

fxmax2 = (PP1 + PP2) * ((l12 + l13) * (.5 * l12 + 1 / 8 * l11) * .5 * l11 - 1 / 8 * l11 ^ 2 * (.5 * l12 + 1 / 6 * l11))
fxmax3 = 1 / 24 * qp * l11 ^ 3 * (.5 * l12 + 3 / 16 * l11)
fxmax4 = (Ha + Hb) * 1 / 6 * l12 ^ 3 - (PP1 + PP2) * (1 / 4 * l12 ^ 2 * l13 - 1 / 6 * l12 ^ 3)
fxmax = 1 / EE / JJ1 * (fxmax1 - fxmax2 - fxmax3) + 1 / EE / JJ2 * fxmax4

fymax1 = (Va + Vb) * (.5 * l12 * l11 * (.5 * l12 + 1 / 8 * l11) + 1 / 8 * l11 ^ 2 * (.5 * l12 + 1 / 6 * l11))
fymax2 = (RR1 + RR2) * ((l12 + l13) * (.5 * l12 + 1 / 8 * l11) * .5 * l11 - 1 / 8 * l11 ^ 2 * (.5 * l12 + 1 / 6 *
l11))
fymax3 = 1 / 24 * qg * l11 ^ 3 * (.5 * l12 + 3 / 16 * l11)
fymax4 = (Va + Vb) * 1 / 6 * l12 ^ 3 - (RR1 + RR2) * (1 / 4 * l12 ^ 2 * l13 - 1 / 6 * l12 ^ 3)
fymax = 1 / EE / JJ1 * (fymax1 - fymax2 - fymax3) + 1 / EE / JJ2 * fymax4
fmax = (fxmax ^ 2 + fymax ^ 2) ^ .5
'PRINT "SIGb="; SIGb; "SIGz="; SIGz; "SIGp="; SIGp; "fmax="; fmax
'PRINT #1, "SIGb="; SIGb; "SIGz="; SIGz; "SIGp="; SIGp; "fmax="; fmax
IF INQ = 2 THEN GOTO 100
IF INQ = 3 THEN GOTO 200
CLS
'PRINT "x#(1)="; X#(1); "x#(2)="; X#(2); "x#(3)="; X#(3)
'PRINT #1, "x#(1)="; X#(1); "x#(2)="; X#(2); "x#(3)="; X#(3)
'PRINT "SIGb="; SIGb; "SIGz="; SIGz; "SIGp="; SIGp; "fmax="; fmax; ""
'PRINT #1, "SIGb="; SIGb; "SIGz="; SIGz; "SIGp="; SIGp; "fmax="; fmax; ""
'PRINT "Mkrc="; Mkrc; "Mkra="; Mkra; "Mkre="; Mkre
'PRINT #1, "Mkrc="; Mkrc; "Mkra="; Mkra; "Mkre="; Mkre
'PRINT "W0e="; W0e; "W0c="; W0c; "W0a="; W0a
'PRINT #1, "W0e="; W0e; "W0c="; W0c; "W0a="; W0a
'PRINT "Mxa="; Mxa; "Mea="; Mya; "Mxc="; Mxc; "Mxe="; Mxe; "Mye="; Mye; "Mua="; Mua; "Mue=";
Mue
'PRINT #1, "Mxa="; Mxa; "Mea="; Mya; "Mxc="; Mxc; "Mxe="; Mxe; "Mye="; Mye; "Mua="; Mua;
"Mue="; Mue
'PRINT "qp="; qp; "qg="; qg; "Fr="; Fr; "Mkr="; Mkr; "Mkr1="; Mkr1; "Mkr2="; Mkr2
'PRINT #1, "qp="; qp; "Fr="; Fr; "Mkr="; Mkr; "Mkr1="; Mkr1; "Mkr2="; Mkr2
'PRINT "PP1="; PP1; "PP2="; PP2; "Ha="; Ha; "Hb="; Hb; "Va="; Va; "Vb="; Vb; "l11="; l11
'PRINT #1, "PP1="; PP1; "PP2="; PP2; "Ha="; Ha; "Hb="; Hb; "Va="; Va; "Vb="; Vb; "l11="; l11; "l12=";
l12; "l13="; l13

'ограничений в виде равенств нет
GOTO 300
'ограничения в виде неравенств
100
R#(1) = 1 - 40 / X#(1)
R#(2) = 120 / X#(1) - 1
R#(3) = 1 - 40 / X#(2)
R#(4) = 70 / X#(2) - 1
R#(5) = 1 - 40 / X#(3)
R#(6) = 50 / X#(3) - 1
R#(7) = 1 - SIGb / SIG
R#(8) = 1 - SIGz / SIG
R#(9) = 1 - SIGp / SIG
R#(10) = 1 - fmax / fdop
GOTO 300

```

```

'целевая функция
200 R#(11) = 3.14 / 4 * ((DD ^ 2 - X#(1) ^ 2) * l11 + 2 * (dd2 ^ 2 - X#(2) ^ 2) * l12 + 2 * (dd3 ^ 2 - X#(3) ^ 2)
* l13)
CLS
PRINT "SIGb="; SIGb; "MIIa "; "SIGz="; SIGz; "MIIa "; "SIGp="; SIGp; "MIIa "; "fmax="; fmax; "MM"
PRINT #1, "SIGb="; SIGb; "MIIa "; "SIGz="; SIGz; "MIIa "; "SIGp="; SIGp; "MIIa "; "fmax="; fmax;
"MM"
'PRINT "Mkrc="; Mkrc; "Mkra="; Mkra; "Mkre="; Mkre
'PRINT #1, "Mkrc="; Mkrc; "Mkra="; Mkra; "Mkre="; Mkre
'PRINT "W0e="; W0e; "W0c="; W0c; "W0a="; W0a
'PRINT #1, "W0e="; W0e; "W0c="; W0c; "W0a="; W0a
'PRINT "Mxa="; Mxa; "Mea="; Mya; "Mxc="; Mxc; "Mxe="; Mxe; "Mye="; Mye; "Mua="; Mua; "Mue=";
Mue
'PRINT #1, "Mxa="; Mxa; "Mea="; Mya; "Mxc="; Mxc; "Mxe="; Mxe; "Mye="; Mye; "Mua="; Mua;
"Mue="; Mue
'PRINT "qp="; qp; "qg="; qg; "Fr="; Fr; "Mkr="; Mkr; "Mkr1="; Mkr1; "Mkr2="; Mkr2
'PRINT #1, "qp="; qp; "Fr="; Fr; "Mkr="; Mkr; "Mkr1="; Mkr1; "Mkr2="; Mkr2
'PRINT "PP1="; PP1; "PP2="; PP2; "Ha="; Ha; "Hb="; Hb; "Va="; Va; "Vb="; Vb; "l11="; l11
'PRINT #1, "PP1="; PP1; "PP2="; PP2; "Ha="; Ha; "Hb="; Hb; "Va="; Va; "Vb="; Vb; "l11="; l11; "l12=";
l12; "l13="; l13
300 END SUB

```

```

SUB STAR

```

```

VN = NX

```

```

STEP1# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) + VN - 1#)

```

```

STEP2# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) - 1#)

```

```

FOR J = 1 TO NX

```

```

    a#(1, J) = 0#

```

```

NEXT J

```

```

FOR I = 2 TO k1

```

```

    FOR J = 1 TO NX

```

```

        a#(I, J) = STEP2#

```

```

    NEXT J

```

```

    L = I - 1

```

```

    a#(I, L) = STEP1#

```

```

NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO k1

```

```

    FOR J = 1 TO NX

```

```

        X1#(I, J) = X#(J) + a#(I, J)

```

```

    NEXT J

```

```

NEXT I

```

```

END SUB

```

```

SUB SUMR

```

```

SUM#(IN) = 0#

```

```

CALL prob(2)

```

```

SEQL# = 0#

```

```

IF NIC = 0 THEN GOTO 444

```

```

FOR J = K7 TO K8

```

```

IF R#(J) >= 0# THEN GOTO 111

    SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
111 NEXT J
444 IF NC = 0 THEN GOTO 313
    CALL prob(1)
    FOR J = 1 TO NC
        SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
    NEXT J
313 SUM#(IN) = SEQL#
    END SUB
    SUB WRIT
    CALL prob(3)
    'PRINT " ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ (ОБЪЕМ КОНСТРУКЦИИ), V= "; R#(K9); "[M^3]"
    'PRINT #1, "ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ "; R#(K9); "[M^3]"
    PRINT " ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ (ОБЪЕМ КОНСТРУКЦИИ), V= "; R#(K9); "[MM^3]"
    PRINT #1, "ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ "; R#(K9); "[MM^3]"
    PRINT " ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
    PRINT #1, "ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
    FOR J = 1 TO NX
        'IF J = 1 THEN PRINT ", X1": GOTO 22
        'IF J = 2 THEN PRINT ", X2": GOTO 22
        'IF J = 3 THEN PRINT ", X3"
'22 PRINT " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; x#(J); "[M]"
'    PRINT #1, "    ВЕКТОР: X("; J; ") = "; x#(J); "[M]"
22 PRINT " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[MM]"
    PRINT #1, "    ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[MM]"
    NEXT J
    IF NC = 0 THEN GOTO 6
    CALL prob(1)
    FOR J = 1 TO NC
        PRINT " H("; J; ") : "; R#(J)
        PRINT #1, "    H("; J; ") : "; R#(J)
    NEXT J
6    IF NIC = 0 THEN GOTO 503
    CALL prob(2)
    FOR J = K7 TO k6
        'PRINT " G("; J; ") : "; R#(J)
        'PRINT #1, "    G("; J; ") : "; R#(J)
    NEXT J
503 END SUB

```


Результаты программы 8

Минимизация объема конструкции валка вальцов лабораторных

<<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>

ОБЩЕЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ: 3

ОБЩЕЕ ЧИСЛО ОГРАНИЧЕНИЙ В ВИДЕ: 1).РАВЕНСТВ : 0

2).НЕРАВЕНСТВ: 10

ВЕЛИЧ.ОПРЕД.РАЗМЕР ДЕФОРМ.МНОГОГРАННИКА: 3

ЧИСЛО ОПРЕД.ОКОНЧАНИЕ ПОИСКА: .001

НАЧАЛО ЦИКЛИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

X(1) = 40

X(2) = 40

X(3) = 40

FDIFER = 6 SR(N1) = 0

НОМЕР СЧЕТА: 1 FDIFER = 6

SIGb= 25.83225 МПа SIGz= 41.61441 МПа SIGp= 33.44678 МПа fmax= .0590967 мм

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 8177737.77320981 [мм^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 40 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 40 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 40 [мм]

SIGb= 25.8219 МПа SIGz= 41.47688 МПа SIGp= 33.22105 МПа fmax= 5.900162E-02 мм

НОМЕР СЧЕТА: 16 FDIFER = .7836851284359826

SIGb= 25.9783 МПа SIGz= 42.46962 МПа SIGp= 34.30003 МПа fmax= 5.979632E-02 мм

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 7828076.767784446 [мм^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 49.948552643882 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 45.11835944760956 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 43.30010979422386 [мм]

SIGb= 25.96452 МПа SIGz= 42.63084 МПа SIGp= 35.07705 МПа fmax= .0598736 мм

НОМЕР СЧЕТА: 32 FDIFER = .6335212673115439

SIGb= 26.09615 МПа SIGz= 43.86807 МПа SIGp= 34.90074 МПа fmax= 6.078114E-02 мм

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 7572920.435826119 [мм^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 54.99999774039859 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 50.69393837881197 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 45.16132503115826 [мм]

SIGb= 26.10781 МПа SIGz= 43.59602 МПа SIGp= 35.64204 МПа fmax= 6.063534E-02 мм

НОМЕР СЧЕТА: 64 FDIFER = .4319217871766445

SIGb= 26.24517 МПа SIGz= 44.59969 МПа SIGp= 38.37674 МПа fmax= 6.141233E-02 мм
ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 7268096.810970254 [мм^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 59.83328239353806 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 52.89726359556248 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 52.3194539344661 [мм]

SIGb= 26.28406 МПа SIGz= 44.20062 МПа SIGp= 38.1859 МПа fmax= 6.122731E-02 мм

НОМЕР СЧЕТА: 404 FDIFER = 6.660283763050884D-04

SIGb= 37.71792 МПа SIGz= 57.11507 МПа SIGp= 36.90737 МПа fmax= 8.408181E-02 мм

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ 4227089.884643417 [мм^3]

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ВЕКТОР: X(1) = 120.1245671867763 [мм]

ВЕКТОР: X(2) = 69.94251388672109 [мм]

ВЕКТОР: X(3) = 49.82012956456423 [мм]

ФИНАЛ

-----STOP-----

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ, ЗАТРАЧИВАЕМОЙ НА ПРОЦЕСС ВАЛЬЦЕВАНИЯ

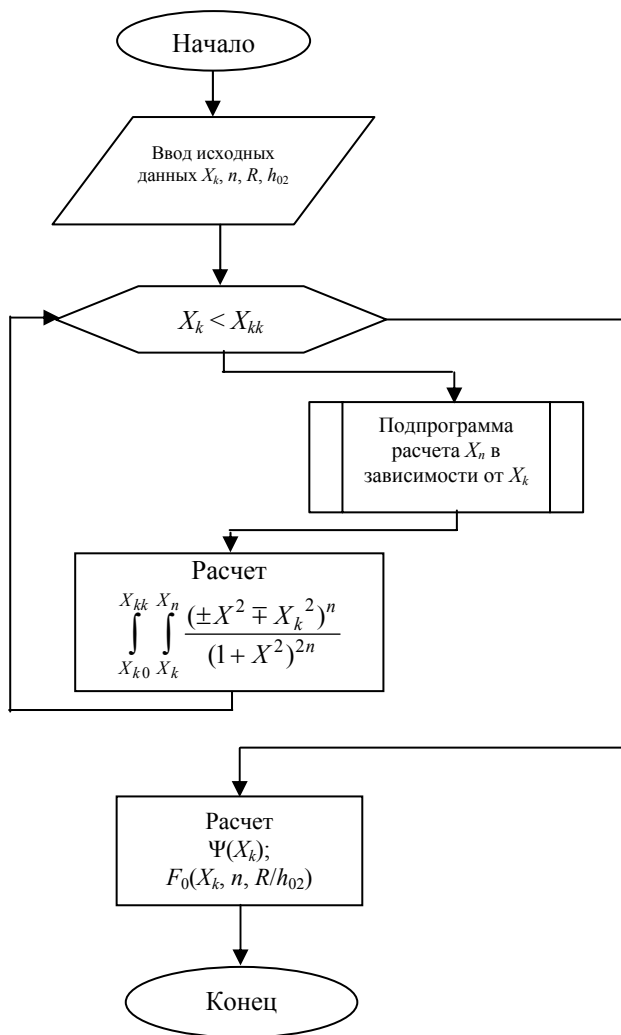


Рис. Ж. Блок-схема алгоритма расчета удельной мощности, затрачиваемой на процесс вальцевания

Идентификаторы к программе 9

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1. Безразмерная координата выхода	X_k	Xk
2. Текущее значение безразмерной координаты выхода	X_{kk}	Xkk
3. Безразмерная координата входа	X_n	Xn
4. Текущее значение безразмерной координаты	X	X
5. Радиус валка, см	R	R
6. Индекс течения материала	n	n
7. Минимальный межвалковый зазор, см	h_{02}	h0

Программа 9

```

REM " Программа расчета удельной мощности P "
DECLARE FUNCTION XnXk (Xkt, g, t, Xn)
CLS
5 CLS : SCREEN 12
***** Построение координатных осей *****
LINE (20, 20)-(20, 460), 4
LINE (20, 440)-(640, 440), 4
  FOR W = 30 TO 550 STEP 10
    LINE (W, 437)-(W, 443), 6
  NEXT W
  FOR w1 = 70 TO 540 STEP 50
    LINE (w1, 430)-(w1, 450), 6
  NEXT w1
LOCATE 28, 15: PRINT "2"
LOCATE 28, 28: PRINT "4": LOCATE 28, 41: PRINT "6"
LOCATE 28, 53: PRINT "8": LOCATE 28, 65: PRINT "10"
LOCATE 28, 71: PRINT "Xk"
LOCATE 2, 4: PRINT "F*10^"
LOCATE 3, 1: PRINT "-1": LOCATE 9, 1: PRINT "-2"
LOCATE 15, 1: PRINT "-2": LOCATE 22, 1: PRINT "-4"
LOCATE 28, 1: PRINT "-3"
LINE (20, 20)-(10, 40), 4
LINE (20, 20)-(30, 40), 4
LINE (600, 440)-(580, 430), 4
LINE (600, 440)-(580, 450), 4
  FOR y = 440 TO 40 STEP -5
    LINE (17, y)-(23, y), 6
  NEXT y
  FOR y1 = 440 TO 40 STEP -50
    LINE (10, y1)-(30, y1), 6

```

NEXT y1

***** Расчет *****

k = 2.302585

e = .01

R = 4

h0 = .075

n1 = 2

t = 1

s1 = 0

Xk0 = .05

Xkk = .5

p = 9

g = 2

***** Расчет знаменателя *****

hk = .05

Xk = Xk0

DO WHILE Xk < Xkk

q = XnXk(Xk, g, t, Xn)

Xn = -1 * Xn

Zn = 0

s = 0

RH = 100

dXk = (Xkk - Xk0) / n1

Xkb = Xk0 + dXk / 2

FOR j = 0 TO n1 - 1

Xkt = Xkb + j * dXk

d1 = (8.88 / SQR(RH)) * (1 + Xkt ^ 2) * (RH + (1 + Xkt ^ 2))

d2 = (1 + Xkt ^ 2) * (Xkt + Xn) + (Xn + Xkt + 1 / 3 * (Xn ^ 3 + Xkt ^ 3))

d = (d1 - d2)

a = (((6 * Xkt ^ 4 + 10 * Xkt ^ 2) / ((1 + Xkt ^ 2) ^ 2)) * (Xkt + Xkt ^ 3 + 3 / 5 * Xkt ^ 5 + 1 / 7 * Xkt ^ 7 - Xn - Xn ^ 3 - 3 / 5 * Xn ^ 5 - 1 / 7 * Xn ^ 7))

b = 6 * Xkt * ATN(Xn) * (Xn + Xn ^ 3 + 3 / 5 * Xn ^ 5 + 1 / 7 * Xn ^ 7) - 6 * Xkt * ATN(Xkt) * (Xn + Xn ^ 3 + 3 / 5 * Xn ^ 5 + 1 / 7 * Xn ^ 7) - Xkt ^ 3 * (118 / 35 + 116 / 35 * Xkt ^ 2 + 6 / 7 * Xkt ^ 4)

c = Xkt * Xn ^ 2 * (118 / 35 + 116 / 35 * Xn ^ 2 + 6 / 7 * Xn ^ 4) + 48 / 35 * Xkt * LOG(1 + Xkt ^ 2) - 48 / 35 * Xn * LOG(1 + Xn ^ 2)

Psi2 = a + b + c

Zn = Zn + Psi2 * d * dXk

eps = ABS(Zn - Zn1) / Zn

***** Расчет числителя *****

dx = (Xn - Xk) / n1

Xb = Xk + dx / 2

FOR i = 0 TO n1 - 1

X = Xb + i * dx

```

a = (((6 * Xkt ^ 4 + 10 * Xkt ^ 2) / ((1 + Xkt ^ 2) ^ 2)) * (Xkt + Xkt ^ 3 + 3 / 5 * Xkt ^ 5 + 1 / 7 * Xkt ^ 7 -
Xn - Xn ^ 3 - 3 / 5 * Xn ^ 5 - 1 / 7 * Xn ^ 7))
b = 6 * Xkt * ATN(Xn) * (Xn + Xn ^ 3 + 3 / 5 * Xn ^ 5 + 1 / 7 * Xn ^ 7) - 6 * Xkt * ATN(Xkt) * (Xn + Xn
^ 3 + 3 / 5 * Xn ^ 5 + 1 / 7 * Xn ^ 7) - Xkt ^ 3 * (118 / 35 + 116 / 35 * Xkt ^ 2 + 6 / 7 * Xkt ^ 4)
c = Xkt * Xn ^ 2 * (118 / 35 + 116 / 35 * Xn ^ 2 + 6 / 7 * Xn ^ 4) + 48 / 35 * Xkt * LOG(1 + Xkt ^ 2) - 48
/ 35 * Xn * LOG(1 + Xn ^ 2)
Psi2ch = a + b + c
IF X ^ 2 > Xk ^ 2 THEN f = ((X ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^ (2 * t + 1)) * Psi2ch
IF X ^ 2 < Xk ^ 2 THEN f = ((Xk ^ 2 - X ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^ (2 * t + 1)) * Psi2ch
s = s + f * dx * dXk
eps = ABS((s - s1) / s)
NEXT i
NEXT j
IF ABS(s - s1) / s < e THEN GOTO 152 ELSE 151
END
151
s1 = s: n1 = n1 * 2: ' PRINT "s="; s; "s1="; s1; "Xk="; Xk; "Xn="; Xn; "n1="; n1
GOTO 3
152 'PRINT "ITOG s="; s; ' "ZN="; Zn; "s1="; s1; "Xk="; Xk; "Xn="; Xn; "n1="; n1
n1 = 2
IF ABS(Zn - Zn1) / Zn < e THEN GOTO 211 ELSE 311
END
311 Zn1 = Zn: n1 = n1 * 2: ' PRINT "Zn="; Zn; "Zn1="; Zn1; "n1="; n1; "eps="; eps
GOTO 3
"Xk="; Xk
W = s / Zn
W = ABS(W)
CIRCLE (20 + 50 * ABS(Xn), 440 + (LOG(.001) / k - LOG(W) / k) * 200), 1, g
CIRCLE (20 + 50 * ABS(Xn), 440 + (LOG(.001) / k - LOG(W) / k) * 200), 2, g
n1 = 2
IF Xk < .25 THEN GOTO 175
IF ABS((Xnt - Xn) / Xn) > .2 THEN hk = hk / 2 ELSE GOTO 175 'hk = .0125:
Xnt = Xn': GOTO 178
175 Xk = Xk + hk
LOOP
END
***** Расчет знаменателя *****
d1 = (8.88 / SQR(RH)) * (1 + Xkt ^ 2) * (RH + (1 + Xkt ^ 2))
d2 = (1 + Xkt ^ 2) * (Xkt + Xn) + (Xn + Xkt + 1 / 3 * (Xn ^ 3 + Xkt ^ 3))
d = (d1 - d2)
a = (((6 * Xkt ^ 4 + 10 * Xkt ^ 2) / ((1 + Xkt ^ 2) ^ 2)) * (Xkt + Xkt ^ 3 + 3 / 5 * Xkt ^ 5 + 1 / 7 * Xkt ^ 7 -
Xn - Xn ^ 3 - 3 / 5 * Xn ^ 5 - 1 / 7 * Xn ^ 7))
b = 6 * Xkt * ATN(Xn) * (Xn + Xn ^ 3 + 3 / 5 * Xn ^ 5 + 1 / 7 * Xn ^ 7) - 6 * Xkt * ATN(Xkt) * (Xn + Xn
^ 3 + 3 / 5 * Xn ^ 5 + 1 / 7 * Xn ^ 7) - Xkt ^ 3 * (118 / 35 + 116 / 35 * Xkt ^ 2 + 6 / 7 * Xkt ^ 4)
c = Xkt * Xn ^ 2 * (118 / 35 + 116 / 35 * Xn ^ 2 + 6 / 7 * Xn ^ 4) + 48 / 35 * Xkt * LOG(1 + Xkt ^ 2) - 48
/ 35 * Xn * LOG(1 + Xn ^ 2)
f1 = d * (a + b + c)
f2 = e * (a + b + c)
fp1 = (m1 * u * h0 ^ 2 * R ^ 2 * (1 + f) * ((u / h0) ^ n) * (((1 + 2 * n) / n) ^ n) * f1) / 2 * q
fp2 = (m1 * u * h0 ^ 2 * R ^ 2 * (1 + f) * ((u / h0) ^ n) * (((1 + 2 * n) / n) ^ n) * f2) / 2 * q

```

```

Psi2 = a + b + c
Zn = Psi2 * d
s = Psich / d
IF s < 0 THEN GOTO 99
Xkt = ABS(Xkt)
IF ABS(s - s1) / s < e THEN GOTO 2 ELSE 1
1 s1 = s: n = n * 2: ' PRINT "s="; s; "s1="; s1; "n="; n
GOTO 3
IF RH = 50 THEN CIRCLE (20 + 50 * Xn, 440 + (LOG(.001) / k - LOG(s) / k) * 200), 1
IF RH = 100 THEN CIRCLE (20 + 50 * Xn, 440 + (LOG(.001) / k - LOG(s) / k) * 200), 2, g
IF RH = 150 THEN CIRCLE (20 + 50 * Xn, 440 + (LOG(.001) / k - LOG(s) / k) * 200), 3, g
IF RH = 200 THEN CIRCLE (20 + 50 * Xn, 440 + (LOG(.001) / k - LOG(s) / k) * 200), 4, g
n = 2
99 Xkt = ABS(Xkt)
END
FUNCTION XnXk (Xk, g, t, Xn)
t = 1 / g
e = .009
n = 2
sa1 = 0
'**** Расчет интеграла SA ****
n = 2
33 'PRINT "Величина n="; n
a = Xk
b = -Xk
dx = (b - a) / n
Xb = a + dx / 2
sa = 0
FOR i = 0 TO n - 1
Xa = Xb + i * dx
IF Xa ^ 2 > Xk ^ 2 THEN af = ((Xa ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + Xa ^ 2) ^ (2 * t + 1))
IF Xa ^ 2 < Xk ^ 2 THEN af = ((Xk ^ 2 - Xa ^ 2) ^ t) / ((1 + Xa ^ 2) ^ (2 * t + 1))
sa = sa + af * dx
NEXT i
IF epsa < e THEN GOTO 22 ELSE 11
11 sa1 = sa: n = n ^ 2
GOTO 33
22
'**** Расчет интеграла SB ****
eb = .001
sb1 = 0
FOR Xn = .002 TO 10.0002 STEP .05
a = Xn
b = Xk
dx = (b - a) / n
Xb = a + dx / 2
sb = 0
FOR i = 0 TO n - 1
X = Xb + i * dx
IF X ^ 2 > Xk ^ 2 THEN bf = ((X ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^ (2 * t + 1))

```

```

IF X ^ 2 < Xk ^ 2 THEN bf = ((Xk ^ 2 - X ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^ (2 * t + 1))
sb = sb + bf * dx
epsb = ABS((sb - sb1) / sb)
NEXT i
IF epsb < eb THEN GOTO 222 ELSE 111
111 sb1 = sb: n = n * 2
GOTO 333
222
eS = .005
IF g = 1 AND Xk < .15 THEN eS = .001
IF g = 2 AND Xk < .36 THEN eS = .0061
IF g = 3 THEN eS = .009
IF g = 4 THEN eS = .008
IF g = 5 THEN eS = .02
epsS = ABS(sa - sb)
IF epsS < eS THEN GOSUB 55 ELSE 56
56
n = 2
NEXT Xn
551 Xkt = Xk
EXIT FUNCTION
55
GOTO 551

```

END FUNCTION

Приложение К

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СУММАРНОГО СДВИГА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВАЛЬЦАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

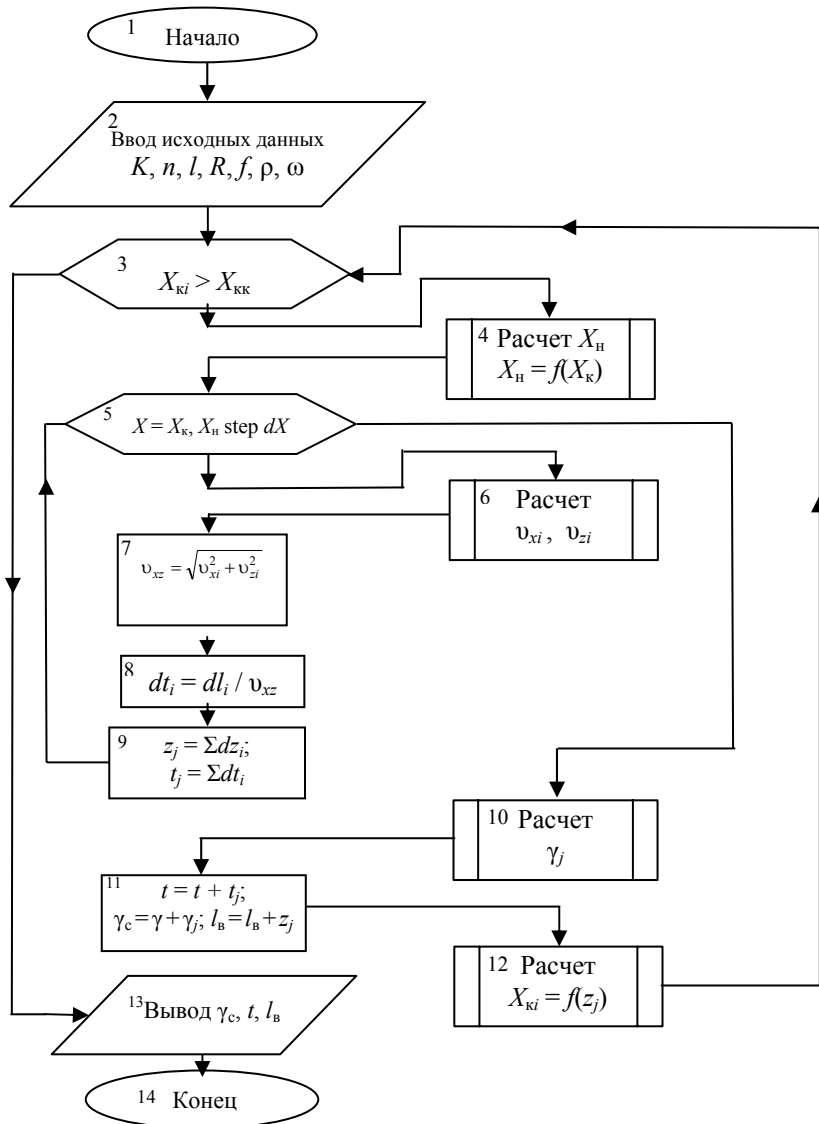


Рис. К. Блок-схема расчета суммарной величины сдвига

Блок 1. Начало.

Блок 2. Ввод исходных данных.

Блок 3. Выполнять расчет для всех текущих значений безразмерной координаты сечения выхода X_{ki} ,
 когда $X_{ki} > X_{kk}$ выполняется условие

Блок 4. Расчет безразмерной координаты сечения входа X_n в зависимости от X_k .

Блок 5. Задается цикл по оси X от X_k до X_n с шагом dX для расчета параметров в зоне деформации материала.

Блок 6. Расчет скоростей течения материала вдоль осей X и Z на участке dz_i .

Блок 7. Расчет результирующей скорости v_{xz} на участке dz_i .

Блок 8. Расчет времени движения материала dt_i на участке dz_i .

Блок 9. Расчет времени t_j и расстояния z_j , которое проходит материал за один проход.

Блок 10. После завершения цикла (блок 5 – 9) расчет сдвига за один проход γ_j .

Блок 11. Расчет суммы текущих значений величин сдвига γ_c , времени t и расстояния l_b .

Блок 12. Расчет X_{ki} для следующего прохода и возврат на блок 3.

Блок 13. После завершения цикла (блок 3 – 9) вывод результатов расчета: величин γ_c , t , l_b .

Блок 14. Конец.

Идентификаторы к программе 10

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
8. Безразмерная координата выхода (в зоне выгрузки)	X_{k0}	Xk0
9. Текущее значение безразмерной координаты выхода	X_{kk}	Xkt
10. Безразмерная координата входа	X_n	Xn
11. Безразмерная координата выхода	X_k	Xk
12. Среднеинтегральные значения компонентов скорости вдоль оси X, Y и результирующая соответственно, см/с	V_{xi}, V_{zi}, V_{xz}	VxS, VzS, Vp
13. Время, затрачиваемое на прохождение dl_i , с	dt_i	dt

Продолжение табл.

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
14. Элементарное перемещение материала в j -й зоне деформации, см	z_i	dz
15. Путь по винтовой линии за время t , см	dl_i	dS
16. Путь, пройденный материалом в зоне деформации, см	z_j	dzSdef
17. Время прохождения материалом зоны деформации, с	t_j	Stdef
18. Суммарная деформация сдвига за один проход	γ_j	Gam
19. Время, затрачиваемое на прохождение l_b , с	t	dtS

20. Суммарная деформация сдвига	γ_c	SGam
21. Суммарный путь вдоль оси z, см	$\sum_{j=1}^k z_j \leq l_b$	dzS
22. Длина валка, см	l_b	Lv

Программа 10

REM "Программа расчета суммарной величины сдвига"

DECLARE FUNCTION deltaX (dzS, Xkt, Lv)

DECLARE FUNCTION XnXk (Xkt, g, t, Xn)

DECLARE FUNCTION Vxx (Xkt, g, t, Xn, Vx, U0, U1, U2, La, X, Y, H, VxS)

DECLARE FUNCTION Vzz (Xkt, g, t, Xn, Vz, U0, U1, U2, La, Y, X, H, VzS, n2)

DECLARE FUNCTION Gamma (n2, dtSdef, dzSdef, XkSr, XnSr, Gam, U0, h0, R, i)

OPEN "VZ.rez" FOR OUTPUT AS #1

CLS : SCREEN 12

rho = .915 'плотность материала, г/см³

Pi = 3.14

h0 = .075 'половина межвалкового зазора, см

Lv = 16 'длина рабочей части валка, см

R = 4 'радиус валка, см

f = 1.2 'фрикция

n = 2

t = 1

FOR n2 = 5 TO 30 STEP 5

'n2 = 25'частота вращения переднего валка, об/мин

'IF n2 = 5 THEN Tau = 720

'IF n2 = 10 THEN Tau = 490

'IF n2 = 15 THEN Tau = 345

'IF n2 = 20 THEN Tau = 240

'IF n2 = 25 THEN Tau = 170

'IF n2 = 30 THEN Tau = 120

n1 = f * n2 'частота вращения заднего валка, об/мин

U1 = (2 * Pi * n1 * R) / 60 'линейная скорость переднего валка, см/сек

U2 = (2 * Pi * n2 * R) / 60 'линейная скорость заднего валка, см/сек

U0 = (U1 + U2) / 2 'средняя линейная скорость, см/сек

La = (U1 - U2) / (2 * U0)

Xk0 = .27

Xkk = .43

dXk = -.05

beta = (Xkk - Xk0) / Lv

dX = .02

hXkt = -.05

g = 3

66

SGam = 0

Gam = 0

ipr = 0

it = 0

```

dtS = 0
dzS = 0
Xkt = Xkk
DO WHILE Xkt > Xk0
it = it + 1
qX = XnXk(Xkt, g, t, Xn)
IF Xn > 5 THEN dXk = dXk + .005: GOTO 44
Kn = SQR(ABS(Xn ^ 2 - R ^ 2))
Kk = SQR(ABS(Xkt ^ 2 - R ^ 2))
alfa(Kn) = ATN(Xn / (SQR(ABS((Xn * SQR(4 * R * h0)) ^ 2 - R ^ 2)))) * 180 / Pi
alfa(Kk) = ATN(Xkt / (SQR(ABS((Xkt * SQR(4 * R * h0)) ^ 2 - R ^ 2)))) * 180 / Pi
KNKk = alfa(Kn) + alfa(Kk)
Lokr = 2 * Pi * R
Ldugi = Pi * R * KNKk / 180
dtaui = (Lokr - Ldugi) / U1
dtSdef = 0
dzSdef = 0
FOR X = -Xn TO Xkt STEP dX
H = h0 * (1 + X ^ 2)
qVx = Vxx(Xkt, g, t, Xn, Vx, U0, U1, U2, La, X, Y, H, VxS)
qVz = Vzz(Xkt, g, t, Xn, Vz, U0, U1, U2, La, Y, X, H, VzS, n2)
Vp = SQR(VxS ^ 2 + VzS ^ 2)
alfa = ABS(VxS) / ABS(VzS)
dz = dX / alfa
dS = SQR((dX ^ 2 + dz ^ 2) * SQR(2 * R * h0))
dt = dS / Vp
dzSdef = dzSdef + dz * SQR(2 * R * h0)
dzS = dzS + dz * SQR(2 * R * h0)
dtSdef = dtSdef + dt
dtS = dtS + dt
dSum = dSum + dS
NEXT X
dtSdef = dtSdef + dtaui
Stdef = Stdef + dtSdef
dtS = dtS + dtaui
Xk1 = Xkt
qdeltaX = deltaX(dzS, Xkt, Lv)
XkSr = (Xk1 + Xkt) / 2
Xn1 = Xn
qX = XnXk(Xkt, g, t, Xn)
XnSr = (Xn1 + Xn) / 2
qG = Gamma(n2, dtSdef, dzSdef, XkSr, XnSr, Gam, U0, h0, R, i)
SGam = SGam + Gam
ipr = ipr + i
44
LOOP
PRINT " dzS="; dzS; "dtS="; dtS
PRINT "SGam="; SGam; "n2="; n2
NEXT n2
END
FUNCTION deltaX (dzS, Xkt, Lv)

```

```

aa = .26795796#
b = 2.5275204#
c = -11.109476#
d = -4.1402528#
nt = .00016987554#
Xkt = aa + b / (1 + EXP(-(dzS - c) / d))
EXIT FUNCTION

```

END FUNCTION

FUNCTION Gamma (n2, dtSdef, dzSdef, XkSr, XnSr, Gam, U0, h0, R, i)

XnSr = -1 * XnSr

g1 = 1.5 * ((1 - (XkSr) ^ 2) * ATN((XkSr - XnSr) / (1 - XnSr * XkSr)) + ((1 + ((XkSr) ^ 2 * XnSr) / (1 + (XnSr) ^ 2)) - (XkSr) ^ 2)) * ((1 - La) / (1 - L * (1 + (XkSr) ^ 2)))

g2 = ((1 - 2 * La ^ 2 * (1 + (XkSr) ^ 2)) / 2 * (1 + (XkSr) ^ 2) * (1 - La ^ 2 * (1 + (XkSr) ^ 2)))

g3 = (XkSr / (1 + (XkSr) ^ 2)) - XnSr / (1 + (XnSr) ^ 2) + ATN((XkSr - XnSr) / (1 - XnSr * XkSr))

g4 = 1 / (2.8 * h0 * dzSdef * (1 + (XkSr) ^ 2) * (XkSr - XnSr))

gg = (g1 + (g2 * g3)) * g4

Gam = gg * (n2 / 30)

Xn = ABS(Xn)

EXIT FUNCTION

END FUNCTION

***** Расчет скорости Vx*****

FUNCTION Vxx (Xkt, g, t, Xn, Vx, U0, U1, U2, La, X, Y, H, VxS)

CLS : SCREEN 12

Pi = 3.14

h0 = .075 'половина межвалкового зазора, см

R = 4 'радиус валка, см

n = 2

t = 1

dY = .005

77

Yx = 0

Vxi = 0

DO WHILE Yx < H

Nu = Yx / H

q = (2 - X ^ 2 + 3 * Xkt ^ 2) / 2 + Nu * La * (1 + X ^ 2)

Vx = -(U0 / (1 + X ^ 2)) * (3 / 2 * Nu ^ 2 * (X ^ 2 - Xkt ^ 2) + q)

Vxi = Vxi + Vx * dY

Yx = Yx + dY

LOOP

VxS = Vxi / H

eps = ABS((VxS - VxSi) / VxS)

IF eps < .05 THEN GOTO 78

dY = dY / 2

VxSi = VxS

GOTO 77

END

78

EXIT FUNCTION

END FUNCTION

***** Расчет скорости Vz*****

FUNCTION VzZ (Xkt, g, t, Xn, Vz, U0, U1, U2, La, Y, X, H, VzS, n2)

SCREEN 12

ro = .965 'плотность материала, г/см³

R = 4 'радиус валка, см

h0 = .075 'половина межвалкового зазора, см

n = 2

t = 1

dY = .05

qq = 17

79

Yz = 0

Vzi = 0

DO WHILE Yz < H

Xkt = ABS(Xkt)

A = 6 * Xkt * ATN(Xkt) + 2 * Xkt ^ 2 * (3 * Xkt ^ 2 + 5) / (1 + Xkt ^ 2) ^ 2

w3 = 6 * Xkt * ((X + X ^ 3 + (3 / 5) * X ^ 5 + (1 / 7) * X ^ 7) * ATN(X) - (8 / 35) * LOG(1 + X ^ 2))

w2 = A * Xkt - 118 / 35 * X * Xkt ^ 2 + A * X ^ 3 - 116 / 35 * Xkt * X ^ 4 + 3 / 5 * A * X ^ 5 - 6 / 7 * Xkt * X ^ 6 + 1 / 7 * A * X ^ 7 - w3

IF w2 = 0 THEN GOTO 1

w = ((1 + X ^ 2) * ((Yz / H) ^ 2 - 1) * (((-2 * X ^ 2 * (5 + 3 * X ^ 2)) / (1 + X ^ 2) ^ 2) - (6 * Xkt * ATN(X) + A))) / w2

Vz = (n2 / 30) * 3 * qq * w / 4 * h0 * SQR(2 * R * h0)

Vzi = Vzi + Vz * dY

1 Yz = Yz + dY

LOOP

VzS = Vzi / H

IF ABS(VzS) > (n2 / 30) * 10 THEN VzS = (n2 / 30) * 10

eps = ABS((VzS - VzSi) / VzS)

IF eps < .15 THEN GOTO 80

dY = dY / 2

VzSi = VzS

GOTO 79

END

80

EXIT FUNCTION

END FUNCTION

FUNCTION XnXk (Xkt, g, t, Xn)

Xk = Xkt

t = 1 / g

e = .009

n = 2

sa1 = 0

***** Расчет интеграла SA *****

n = 2

33

A = Xk

b = -Xk

dX = (b - A) / n

xb = A + dX / 2

sa = 0

```

FOR i = 0 TO n - 1
Xa = xb + i * dX
IF Xa ^ 2 > Xk ^ 2 THEN af = ((Xa ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + Xa ^ 2) ^ (2 * t + 1))
IF Xa ^ 2 < Xk ^ 2 THEN af = ((Xk ^ 2 - Xa ^ 2) ^ t) / ((1 + Xa ^ 2) ^ (2 * t + 1))
sa = sa + af * dX
epsa = ABS((sa - sa1) / sa)
NEXT i
IF epsa < e THEN GOTO 22 ELSE 11
11 sa1 = sa: n = n ^ 2
GOTO 33
22
***** Расчет интеграла SB *****
eb = .001
sb1 = 0
FOR Xn = .002 TO 10.0002 STEP .05
333
A = Xn
b = Xk
dX = (b - A) / n
xb = A + dX / 2
sb = 0
FOR i = 0 TO n - 1
X = xb + i * dX
IF X ^ 2 > Xk ^ 2 THEN bf = ((X ^ 2 - Xk ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^ (2 * t + 1))
IF X ^ 2 < Xk ^ 2 THEN bf = ((Xk ^ 2 - X ^ 2) ^ t) / ((1 + X ^ 2) ^ (2 * t + 1))
sb = sb + bf * dX
epsb = ABS((sb - sb1) / sb)
NEXT i
IF epsb < eb THEN GOTO 222 ELSE 111
111 sb1 = sb: n = n * 2
GOTO 333
222
eS = .005
IF g = 1 AND Xk < .165 THEN eS = .0001
IF g = 3 THEN eS = .009
epsS = ABS(sa - sb)
IF epsS < eS THEN GOSUB 55 ELSE 56
56
n = 2
NEXT Xn
551 Xkt = Xk
EXIT FUNCTION
55
GOTO 551
END FUNCTION

```

Результаты расчета программы 10

SGam= 563.4545 n2= 5 об/мин dzS= 18.40935 см dtS= 773.1488 cit= 75
SGam= 1126.909 n2= 10 об/мин dzS= 18.40935 см dtS= 386.5744 cit= 75
SGam= 1690.363 n2= 15 об/мин dzS= 18.40935 см dtS= 257.7162 cit= 75

SGam= 2253.818 n2= 20 об/мин dzS= 18.40935 см dtS= 193.2872 cit= 75

SGam= 2817.272 n2= 25 об/мин dzS= 18.40935 см dtS= 154.6295 cit= 75

SGam= 3380.726 n2= 30 об/мин dzS= 18.40935 см dtS= 128.8581 cit= 75