

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ИМЕНИ ПЕТРА ВАСИЛЕНКО

На правах рукописи

ЦЫГАНЕНКО МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.869.88:635.64

**РАЗРАБОТКА КОНТЕЙНЕРА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО  
МЕХАНИЗАЦИЮ ПОГРУЗОЧНО – РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ  
И СОКРАЩЕНИЕ ПОТЕРЬ ОВОЩЕЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ**

05.05.11 «Машины и средства механизации  
сельскохозяйственного производства»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Мельник Виктор Иванович

Харьков 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 7  |
| ГЛАВА 1. ТАРА И ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОСТЬ ПЛОДООВОЩНОЙ<br>ПРОДУКЦИИ.....   | 12 |
| 1.1. Общие тенденции совершенствования тары для<br>транспортирования плодоовощной продукции.....                                 | 12 |
| 1.1.1. Жесткие конструкции контейнеров.....  | 15 |
| 1.1.2. Применение эластичных элементов в конструкциях<br>контейнеров.....  | 21 |
| 1.2. Физико-механические свойства плодов и факторы, влияющие<br>на их сохранность при транспортировании.....                     | 25 |
| 1.3. Приборы для изучения разрушающих нагрузок<br>плодов и овощей.....   | 34 |
| Выводы и задачи исследования.....  | 36 |
| ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛОДА ТОМАТА В<br>РЕАЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ НАГРУЖЕНИЯ.....   | 38 |
| 2.1. Общие положения из теории пластичности.....   | 38 |
| 2.2. Постановка задачи о взаимодействии плодов томатов<br>с жестким плоским деформатором.....                                    | 43 |
| 2.3. Формулировка граничных условий трения, действующих в<br>пределах пятен контакта.....  | 45 |
| 2.4. Анализ закономерностей ориентации главных напряжений<br>и главных площадок в объеме и у поверхности плода томата.....       | 46 |
| 2.4.1. Сферическое модельное тело. Трехмерный случай.....  | 47 |
| 2.4.2. Сферическое модельное тело. Двумерный случай.....   | 52 |
| 2.4.3. Цилиндрическое модельное тело. Двумерный случай.....  | 54 |
| 2.4.4. Общие закономерности ориентации главных площадок<br>и напряжений для сферического и цилиндрического<br>модельных тел..... | 58 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.5. Анализ закономерностей напряженного состояния в области пятна контакта плода с деформатором, а также в его произвольном горизонтальном сечении.....             | 59  |
| 2.6. Вывод выражений интегралов полного напряжения, действующего в пределах произвольного горизонтального сечения плода томата как изначально сферического тела..... | 61  |
| 2.6.1. Интеграл внешней нагрузки.....  | 61  |
| 2.6.2. Интеграл полного напряжения, действующего во внутреннем горизонтальном сечении тела томата.....   | 62  |
| 2.6.3. Анализ полученных выражений для интегралов внешней нагрузки и полного напряжения в произвольном горизонтальном сечении.....                                   | 63  |
| 2.7. Алгоритм расчета формы свободного контура плода томата как изначально сферического модельного тела.....   | 74  |
| 2.8. Плод томата как цилиндрическое модельное тело.....  | 84  |
| 2.8.1. Обоснование заданного значения интеграла внешней нагрузки.....  | 85  |
| 2.8.2. Алгоритм расчета формы свободного контура плода томата как изначально цилиндрического модельного тела.....  | 86  |
| 2.8.3. Оценка адекватности предлагаемой математической модели.....   | 91  |
| 2.9. Критерий разрушения плода томата.....   | 98  |
| 2.10. Задача о взаимодействии плодов томатов между собой и с жестким плоским деформатором одновременно.....  | 99  |
| 2.10.1. Постановка задачи.....   | 99  |
| 2.10.2. Адаптация условия задачи к случаю с цилиндрическими модельными телами.....   | 102 |
| 2.10.3. Алгоритм решения задачи о взаимодействии плодов томатов между собой и с жестким плоским деформатором одновременно.....                                       | 103 |
| Выводы.....  | 114 |

## ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И КОНСТРУКЦИИ

|  |     |
|--|-----|
| КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТОМАТОВ.....  | 116 |
| 3.1. Обоснование габаритных размеров, общей грузоподъемности<br>контейнера, количества и размеров секций в нем.....  | 116 |
| 3.1.1. Габариты контейнера в горизонтальном сечении.....   | 116 |
| 3.1.2. Статические нагрузки как фактор для определения глубины<br>секции контейнера и высоты слоя томатов в ней..... | 117 |
| 3.1.3. Максимальная допустимая статическая нагрузка на плоды.....  | 119 |
| 3.1.4. Вибрационные воздействия на плоды при транспортировке....   | 120 |
| 3.1.5. Определение собственных частот колебаний секции<br>контейнера.....  | 126 |
| 3.1.6. Определение высоты секции контейнера.....   | 130 |
| 3.1.7. Определение количества секций и общей грузоподъемности<br>контейнера.....                                     | 131 |
| 3.2. Разработка конструкции контейнера.....  | 132 |
| 3.2.1. Устройство и принцип работы секции контейнера.....  | 132 |
| 3.2.2. Конструкция и параметры контейнера в целом.....   | 134 |
| Выводы.....  | 136 |

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ

|  |     |
|--|-----|
| ТОМАТОВ, ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОНТЕЙНЕРА<br>И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЦЕЛОМ.....  | 138 |
| 4.1. Физико-механические свойства плодов томатов.....  | 138 |
| 4.1.1. Программа экспериментальных исследований.....   | 138 |
| 4.1.2. Методика экспериментальных исследований величины<br>статической разрушающей нагрузки плодов томатов в<br>контакте с жесткими и эластичными поверхностями..... | 139 |
| 4.1.3. Методика экспериментальной оценки модуля упругости<br>плодов томатов .....  | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.1.4. Методика экспериментальной оценки коэффициента трения плодов томатов на различных поверхностях.....   | 144 |
| 4.1.5. Методика экспериментальной оценки плотности вещества зрелых плодов томатов.....   | 144 |
| 4.1.6. Методика экспериментальной оценки качественной стороны соответствия между законами деформирования модельного тела и реальными плодами томатов.....    | 145 |
| 4.1.7. Результаты экспериментальных исследований величины статической разрушающей нагрузки плодов томатов.....   | 146 |
| 4.1.8. Результаты экспериментальных исследований модуля упругости плодов томатов.....  | 150 |
| 4.1.9. Результаты экспериментальных исследований внешнего коэффициента трения плодов по различным поверхностям.....  | 152 |
| 4.1.10. Результаты экспериментальных измерений плотности вещества зрелых плодов томатов.....   | 153 |
| 4.1.11. Результаты экспериментальной оценки качественной стороны соответствия между законами деформирования модельного тела и реальными плодами томатов..... | 153 |
| 4.2. Исследования элементов конструкции контейнера.....  | 155 |
| 4.2.1. Программа исследований.....   | 156 |
| 4.2.2. Методика и результаты исследований.....   | 156 |
| 4.3. Оценка эффективности контейнеров предлагаемой конструкции.....  | 159 |
| 4.3.1. Программа оценки эффективности контейнеров предлагаемой конструкции.....  | 159 |
| 4.3.2. Методика лабораторных исследований повреждаемости плодов томатов в многоярусном контейнере с эластичными оболочками.....                              | 159 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3.3. Результаты лабораторных исследований повреждаемости плодов томатов в многоярусном контейнере с эластичными оболочками..... | 162 |
| Выводы.....   | 163 |
| ГЛАВА 5. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ.....      |     |
| 5.1. Результаты производственной проверки.....  | 167 |
| 5.2. Оценка технико-экономической эффективности контейнерных перевозок овощей.....  | 172 |
| Выводы.....   | 174 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....   | 175 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....  | 178 |
| Приложение А.....   | 190 |
| Приложение Б.....   | 192 |
| Приложение В.....   | 193 |
| Приложение Г.....   | 194 |
| Приложение Д.....   | 199 |
| Приложение Е.....   | 215 |
| Приложение Ж.....   | 231 |

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях перехода к рыночным отношениям и бездотационной экономики Украины повышение экономической эффективности использования потенциала агропромышленного комплекса приобретает важное значение.

Увеличение производства овощей, повышение качества и сокращение потерь продукции овощеводства непосредственно связано с эффективностью системы доставки овощей потребителям. Низкая эффективность работы транспорта, резкое повышение тарифов на перевозки, несовершенство транспортной тары и отсутствие механизации погрузочно-разгрузочных операций является одной из причин сокращения производства плодовоовощной сельскохозяйственной продукции.

На погрузочно-разгрузочные и транспортные работы приходится 40...45% трудоемкости и 64...66% издержек к затратам в сфере механизации сельскохозяйственного производства [1]. Причем доля транспортных издержек имеет тенденцию к дальнейшему увеличению.

Велики потери овощей и плодов при транспортировке и хранении, обусловленные несовершенством технических средств, отсутствием специализированных контейнеров и тары-оборудования для легко повреждаемых и скоропортящихся овощей и плодов, таких как томаты, зеленные овощи, абрикосы, слива и другие. **Фактом, свидетельствующим об актуальности диссертации,** является исследование качественно нового вида тары с целью сокращения потерь плодовоовощной продукции, а также повышения эффективности использования транспортных средств при перевозке овощей за счет механизации погрузочно-разгрузочных операций.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнялась в рамках госбюджетной тематики научно-исследовательской работы кафедры "Эксплуатация МТП" ХДТУСГ, начиная с 1991г. за темами: "Повышение эффективности производства и качества сельскохозяйственной

продукции путем усовершенствования технологических процессов, повышение уровня использования и технологического обеспечения машин при механизации и автоматизации операций прогрессивных технологий производства, транспортирования и подготовки к сохранению с.г. продукции" (1991-1995г Государственная регистрация на время выполнения не проводилась), а также "Повышение уровня земледелия путем усовершенствования машиноиспользования при обеспечении требований экологии и уменьшении энерго- и материалоемкости процессов производства и транспортирования с.-х. продукции" (1996-2000г. Государственная регистрация на время выполнения не проводилась), а также за хозрасчетной темой №66-88 "Механизация процессов производства овощей в совхозе "Харьковская овощная фабрика".

**Целью настоящей работы является:** уменьшение потерь томатов при перевозках из мест производства к потребителям, за счет использования в качестве транспортной тары многоярусных контейнеров, содержащих устройства снижающие динамические воздействия на плоды.

Достижение такой цели предполагает **выполнение следующих задач:**

- 1) выполнить исследование физико-механических свойств плодов районированных сортов томатов открытого и закрытого грунта, характеризующих их стойкость к статическим и динамическим воздействиям;
- 2) разработать математические модели механизмов разрушения плодов томатов в процессе их внешнего нагружения;
- 3) провести математическое моделирование силового воздействия на плоды, в ситуациях которые штатно возникают при их транспортировании с применением контейнерной или ящичной тары;
- 4) учитывая современные тенденции в совершенствовании ящичной и контейнерной тары, а также, опираясь на результаты математического моделирования, согласовать конструкцию и параметры контейнера, позволяющие минимизировать потери томатов в процессе их транспортирования;



- 5) провести лабораторные и производственные испытания разработанной конструкции многоярусного контейнера с эластичными оболочками;
- 6) провести технико-экономическую оценку предложенной конструкции контейнера при транспортировании томатов.

**Объект исследования:** процесс транспортирования плодов томатов в многоярусных контейнерах с эластичными оболочками.

**Предмет исследования:** многоярусный контейнер с эластичными оболочками для транспортирования легкоповреждаемых овощей и фруктов.

**Научная новизна полученных результатов:**

— получило дальнейшее развитие исследования физико-механических свойств плодов томатов, районированных в Харьковской области, характеризующих их стойкость к механическим действиям возникающих при погрузочно-разгрузочных и транспортных операциях;

— впервые получены математические выражения, которые моделируют статический процесс нагружения плодов томатов и позволяют рассчитывать напряженное состояние и деформацию плодов;

— на основании применения разработанных математических моделей показано, что при наличии боковой поддержки плоды томатов способны выдерживать большие нагрузки при тех же деформациях;

— в качестве тары для транспортирования плодоовощной продукции предложен многоярусный контейнер с эластичными оболочками, который реализует механизм боковой поддержки плодов и тем самым обеспечивает их большую сохранность при транспортировании.

**Практическое значение работы** может рассматриваться как в теоретическом, так и в практическом смысле.

Показано, несмотря на то, что реальный объект плод томата в процессе транспортирования в действительности претерпевает объемное напряженное состояние, параметры его нагружения и деформации можно в должной мере точно рассчитывать на основе уточненной двумерной модели пластичности.

При этом следует использовать полученные экспериментально следующие параметры модельной среды: а) удельный вес  $\gamma \in [0,81; 1,12]$ , г/мл; б) пластическая постоянная  $k \in [0,071; 0,097]$ , Н/мм<sup>2</sup>; в) коэффициент внешнего трения  $f \in [0,27; 0,62]$ . Еще с большей степенью адекватности предлагаемые математические модели можно задействовать в других задачах при расчете плоского напряженного состояния реальных цилиндрических тел.

Суугобо практическое значение работы состоит в том, что предлагаемый многоярусный контейнер с эластичными оболочками в сравнении с ящичной тарой обеспечивает снижение интенсивности повреждаемости томатов при транспортировании в 2...2,5 раза. Кроме того он проще конкурентов по конструкции и удобнее в обслуживании.

Результаты экспериментальных исследований переданы в УКРНИИОБ и реализованы Харьковской и Змиевской овощными фабриками. В учебном процессе на кафедре "сельскохозяйственные машины" используется устройство для исследования физико-механических свойств плодов.

**Личный вклад соискателя.** Основные исследования за темой диссертации выполнены автором лично. В научных трудах опубликованных в соавторстве [1, 3, 5, 8 - 14] личный вклад составляет 60...70%. Работы [1, 3, 5, 8] касаются результатов исследования физико-механических свойств томатов, которые характеризуют их стойкость к механическим воздействиям, которые возникают в процессе транспортировки. В работах [9, 10, 14] изложено обоснование конструктивных особенностей многоярусного контейнера с эластичными оболочками, предназначенного для транспортирования томатов. В работах [11 - 13] приведена сущность математических моделей процессов внешней нагрузки плодов томатов и алгоритм расчета изменения формы бокового контура плода томата под действием внешней силы. Экспериментальные лабораторные и полевые исследования, а также сравнения результатов теоретического и экспериментального исследования по потерям продукции,

которая перевозится в традиционной ящичной таре и разработанных контейнерах выполненные автором самостоятельно [6, 7].

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы и основные положения диссертации докладывались на ежегодных научно - практических конференциях профессорско - преподавательского состава ХИМЕСХ, ХНТУСХ (1988 - 2007рр.), Всесоюзной конференции из земледельческой механики, посвященной 110-ти летнему юбилею академика Горячкина (г. Мелитополь, 1989.), Всесоюзной научно - технической конференции " Совершенствование использования МТП" (г. Харьков, 1990.), Международная научно - практическая конференция „Технический прогресс в растениеводстве” посвященная 70-ти летнему юбилею ХДТУСХ (г. Харьков, ХГТУСХ, 2000.), Международная научно - практическая конференция „Технический прогресс в АПК” (г. Харьков, ХГТУСХ, 2002.), Международная научно - практическая конференция „Технический прогресс в АПК” - (г. Харьков, ХНТУСХ, 2004р.), X международная научно - производственная конференция „Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения” (г. Белгород, ГСХА, 2006р.).

**Публикации результатов исследований.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 14 статьях, 12 в профессиональных изданиях, в частности 2 - самостоятельно, новое техническое решение защищено авторским свидетельством на изобретение.

Работа выполнена на кафедре «Эксплуатация машинно-тракторного парка» (ЭМТП) Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (ХНТУСХ).

Результаты работы переданы в УкрНИИОБ и реализованы Харьковской и Змиевской овощными фабриками. В учебном процессе на кафедре "сельскохозяйственные машины" используется устройство для исследования физико-механических свойств плодов.

# РАЗДЕЛ 1

## ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТАРНЫМ ПЕРЕВОЗКАМ ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Общие тенденции совершенствования тары для транспортирования плодоовощной продукции

Традиционные тарно-штучные перевозки плодоовощной сельскохозяйственной продукции характеризуются большим объемом тяжелых ручных погрузочно-разгрузочных операций и сопровождаются значительными потерями транспортируемой продукции. Использование различной по размерам мелкой деревянной тары сдерживает комплексную механизацию и тем более автоматизацию погрузочно-разгрузочных, транспортных, складских (ПРТС) работ.

В силу специфических особенностей, обусловленных ручной выборочной уборкой и упаковкой плодов и овощей, тарно-штучные перевозки остаются преобладающими в большинстве хозяйств и предприятий Украины. Совершенствование этого способа транспортировки плодов и овощей осуществляется в направлении замены деревянных ящиков картонными или пластмассовыми [2, 3, 4]. Выпуск тары из гофрированного картона позволяет сохранить огромное количество древесины, так как 1 тонна картона заменяет  $16 \text{ м}^3$  древесины. Перспективна и полимерная тара. Преимуществами пластмассовых ящиков по сравнению с деревянными ящиками являются: меньший собственный вес, негигроскопичность материала, уменьшение бактериальной обсемененности, простота очистки, эстетический внешний вид. Кроме того, одна тонна пластмассовых ящиков эквивалентна количеству деревянных ящиков, на изготовление которых расходуется более  $50 \text{ м}^3$  древесины.

Для доставки в магазины ягод, фруктов, томатов применяется за рубежом одноразовая тара в виде ящиков из полистирола. Собственная масса такого ящика из полистирола составляет всего 0,295 кг. К их недостатком

следует отнести загрязнение окружающей среды из-за большого количества отходов использованной тары.

Пластмассовые и картонные ящики могут иметь преимущества. Если на их дне снаружи выполнить пазы, соответствующие выступам в верхних углах таких ящиков, то это дает возможность штабелировать их до 20 ярусов. Таким образом, пластмассовые и картонные ящики строго одинаковых размеров, обеспечивающих надежное штабелирование, являются хорошей предпосылкой перехода к механизированным системам пакетных перевозок плодов и овощей.

Механизация погрузочно-разгрузочных работ становится возможной в результате укрупнения грузовых единиц до 0,5 – 1,0 тонны и выше путем пакетирования ящиков или лотков на плоском поддоне или в ящичных поддонах. Формирование пакетов целесообразно выполнять в процессе уборки урожая или на пунктах товарной обработки овощей и фруктов.

Простейшими техническими средствами пакетирования являются плоские и стоечные поддоны [5, 6]. Комплексная механизация ПРТС работ в системе пакетных перевозок достигается лишь при использовании специальных пакетформирующих и расформирующих установок и погрузчиков, что существенно ограничивает применение пакетных перевозок овощей и фруктов в магазины.

Более предпочтительным представляется применение специальной тары-оборудования, выполненной в виде сборно-разборных сетчатых ящиков, штабелируемых в 2 – 3 яруса на передвижной раме-тележке [7, 8] или контейнеров для транспортировки и хранения плодоовощной продукции, затаренной в ящики [9, 10].

В целях совершенствования пакетных перевозок овощей были предложены пакетируемые ящичные поддоны [11, 12]. Отдельный ящичный поддон (рис.1.1), входящий в состав пакета, выполнен в виде легкого металлического каркаса с днищем и стенками. Каждый поддон имеет внизу

четыре опоры с вырезами. Эти опоры, взаимодействуя с выступами другого поддона, образуют жесткий устойчивый пакет.

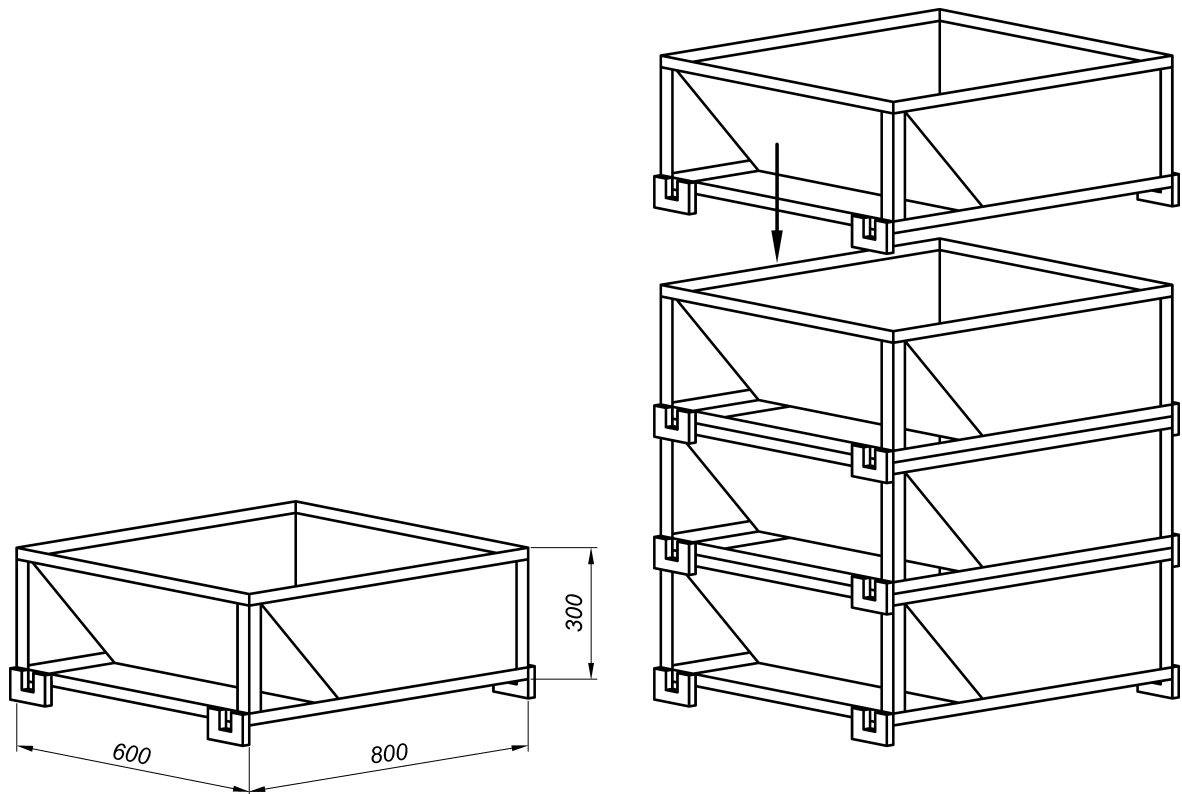


Рис. 1.1 Пакет из ящичных поддонов для перевозки легкоповреждаемого плодовоовощного сырья

В процессе уборки урожая в поле или в саду производится заполнение ящичного поддона, затем на него устанавливается порожний и после заполнения его — следующий порожний. Пакеты из 4–5 секций загружаются в транспортные средства механизированным способом. Выгрузка овощей из такого пакета в магазине производится в обратном порядке, а на консервном заводе опрокидыванием пакета. Высота отдельного ящичного поддона установлена равной 300 мм, поэтому слой плодов в секции не превышает допустимых размеров.

Для пакетной перевозки ягод и другой легкоповреждаемой продукции предложен многоярусный пакет-контейнер [13]. Он выполнен в виде поддона на роликах с двумя стойками, на которые закреплены два ряда поворотных лотков. Поворачиваясь вокруг стоек, лотки образуют удобное для загрузки

пространство или складываются в компактный транспортный пакет. Недостатком этого контейнера является очень большая собственная масса.

Стремление к дальнейшему укрупнению отдельной грузовой единицы с целью интенсификации погрузочно-разгрузочных работ привело к необходимости замены ящичной тары более вместительными контейнерами. Этому способствовала и большая селекционная работа по выведению перспективных сортов томатов и других овощей и фруктов.

1.1.1. Жесткие конструкции контейнеров. Контейнеризация перевозок грузов в промышленно развитых странах мира характеризует научно-технический прогресс на транспорте и в сельском хозяйстве. В сельском хозяйстве США используется около 700 видов специализированных контейнеров [14]. Широко применяется перевозка плодов, овощей, картофеля в контейнерах непосредственно с полей. При этом замена ящиков контейнерами уменьшает стоимость тары на 50%, затраты труда на 80%.

В нашей стране при перевозке картофеля и некоторых видов овощей в торговую сеть выпускаются специализированные складные контейнеры [15]. Эти контейнеры представляют собой довольно тяжелый металлический каркас с деревянными решетчатыми стенками и сплошным дном. Существенными недостатками этих контейнеров являются значительная собственная масса, невысокая прочность и жесткость разборной конструкции, большая трудоемкость сборки и разборки.

В Украине успешно осуществлялись контейнерные перевозки сахарной свеклы, картофеля, яблок, томатов и других овощей, составлявшие в отдельные годы свыше миллиона тонн [16, 17]. Так в украинском научно-исследовательском институте садоводства (УНИИС) под руководством Демидко М.Е. создана система контейнерных перевозок яблок в деревянных контейнерах размерами в плане 1200 x 1000 мм и высотой 800 мм. Контейнеры перед началом уборки вывозят в сад и равномерно расставляют в междурядьях. После накопления их вывозят вилчатым погрузчиком на

межквартальную дорогу для погрузки в автомобили. В линиях товарной обработки яблок предложена установка для опорожнения контейнеров погружением в воду. Установка предназначена для уменьшения повреждения и порчи яблок в линиях товарной обработки.

Созданы контейнеры, в том числе и крупнотоннажные, для перевозки таких массовых и легкоповреждаемых овощей как томаты [18]. При сплошной одноразовой уборке томатов комбайнами в хозяйствах применяют контейнеры в виде ящичных поддонов, устанавливаемые в один ряд на платформе ПТ-3,5, движущейся рядом с томатоуборочным комбайном. Деревянные контейнеры вместимостью 0,5 тонны загружаются комбайном. Далее платформа доставляется трактором на пункт первичной переработки томатов. При наклоне рамы платформы контейнеры по роликам перемещаются на землю.

Недостатком данной системы контейнерных перевозок является низкая производительность транспортных средств, сдерживающая производительность уборочного комплекса. Этот недостаток устраняется применением крупнотоннажных контейнеров. Контейнеры в виде съемных кузовов грузоподъемностью до 3,0 т с внутренними вертикальными перегородками и горизонтальными полками применялись на Янгиюльском консервном заводе Узбекистана (рис.1.2а) [16]. Контейнер представляет собой сварную конструкцию размерами 3000х1950х1150мм. И состоит из двух симметрично расположенных частей, каждая часть разделена на пять отсеков. Каждый отсек разделен по высоте четырьмя наклонными полками, распределяющими нагрузку плодов на дно контейнера. Дно контейнера выполнено из сплошного листа и расположено под углом 30° к горизонту.

Аналогичный контейнер с гидравлической загрузкой (рис.1.2б) [16] и выгрузкой томатов сконструирован Украинским НИИ консервной промышленности. Однако из-за громоздкости, сложности и других недостатков эти контейнеры применения не нашли.



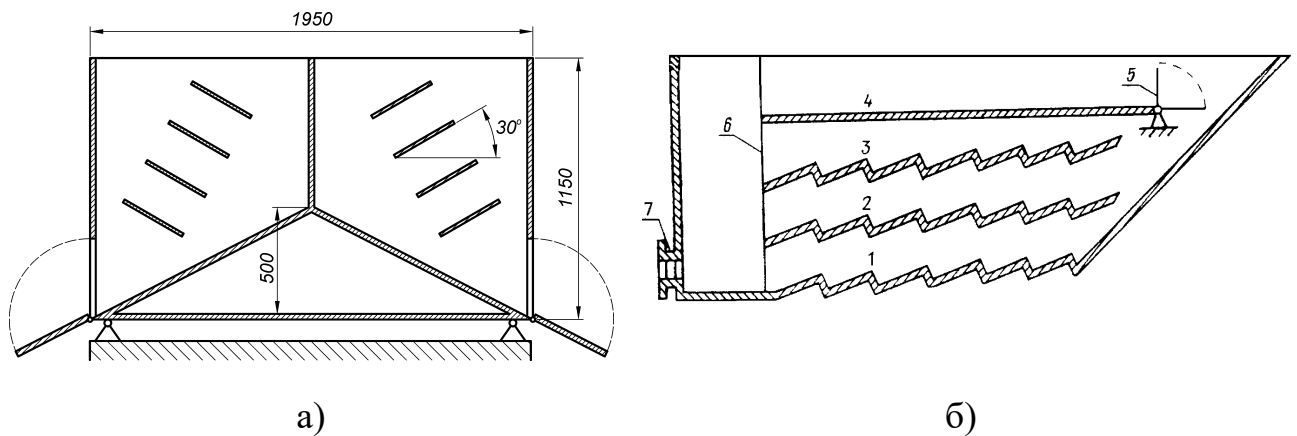


Рис. 1.2. Большегрузные контейнеры для томатов: а) Янгиульского консервного завода Узбекистана; б) контейнер конструкции УкрНИИКП

Более широко известны в мире и применяются во многих странах системы, основанные на применении контейнеров-кузовов объемом до  $25 \text{ м}^3$  и прицепов, оборудованных гидроприводными подъемными механизмами для установки и съема контейнеров. Это германские системы „Динозавр” и „Фар”, финская „Мультилифт” и другие. Применяются такие контейнеры при уборке и перевозке зерновых, сахарной свеклы, кормов, картофеля, лука и других видов сельскохозяйственной продукции. Но для томатов машинной уборки они не пригодны из-за слишком больших размеров.

Для перевозки томатов от уборочных машин лучше подходят металлические и пластмассовые емкости типа „Гондола” вместимостью 8 – 12 тонн, установленные на тракторных или автомобильных прицепах [19, 20]. Загрузка емкостей томатами производится комбайном в процессе совместного движения, а выгрузка на пункте первичной переработки или консервном заводе через боковое окно в гондоле при подаче в нее воды.

Аналогичный прицеп ПТ-12 грузоподъемностью 12,0 т разработан и серийно выпускается в Украине Николаевским ГСКБ.

Одновременно с тенденцией укрупнения вместимости контейнеров для овощей четко выявилась тенденция, выражающаяся в разработке специаль-

ных инженерных мероприятий и конструкторских решений, обеспечивающих уменьшение повреждений и потерь овощей и плодов.

На рис. 1.3 представлены контейнеры с внутренними наклонными полками, которые уменьшают высоту слоя плодов, а соответственно и давление на нижние слои плодов. Но эти конструкции не лишены недостатков: процент повреждаемости томатов превышает 20%, большой собственный вес, низкий коэффициент тары и ряд других недостатков [21, 22].

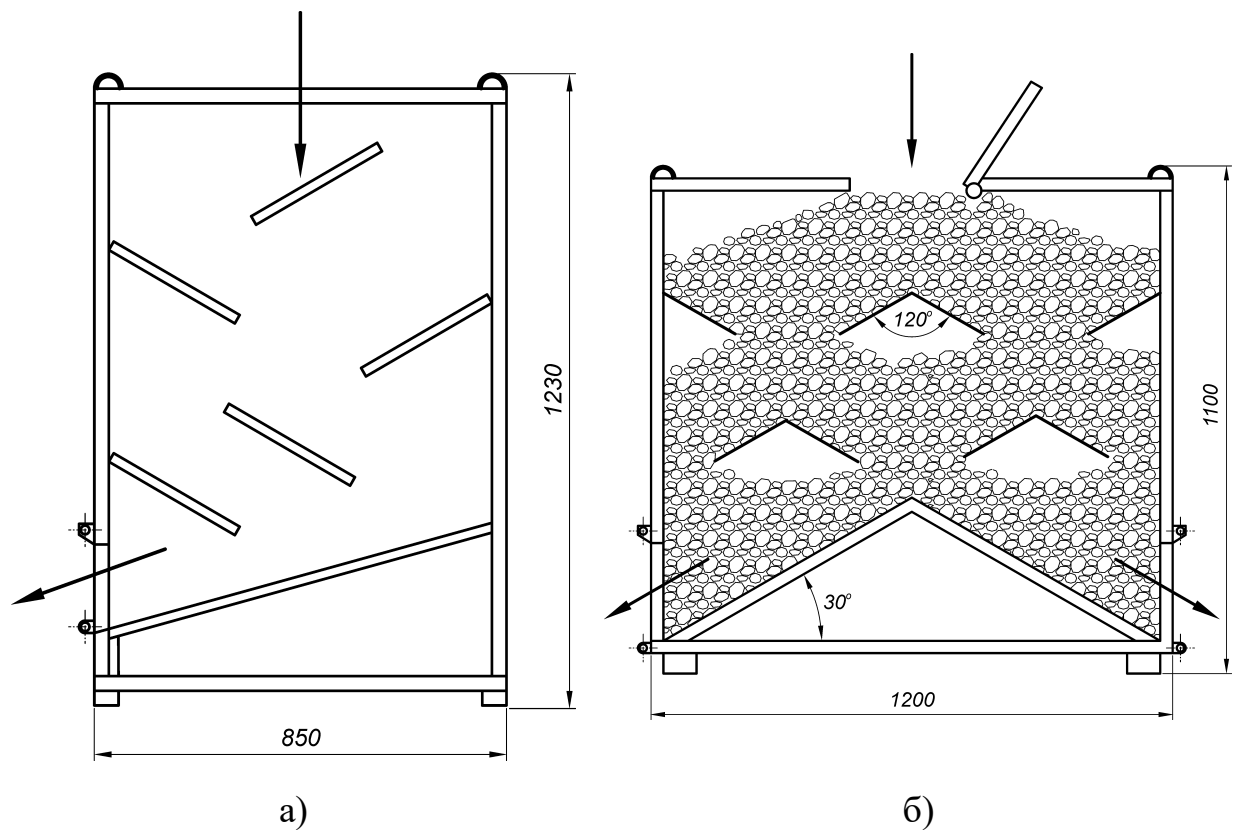


Рис. 1.3. Контейнеры, с внутренними наклонными полками, для томатов: а) контейнер конструкции Ленинадского производственного объединения консервной промышленности; б) контейнер конструкции ВНИИОБ.

С целью уменьшения повреждаемости плодов имеются и другие технические решения – применение многоярусных контейнеров. Примером такого решения можно считать контейнер для томатов многоуровневой выборочной уборки конструкции В.А. Каверина (рис. 1.4). Для уменьшения нагрузки на плоды контейнер выполнен многоярусным и представляет собой сварной

каркас, разделенный наклонными полками на пять секций, с решетчатыми проволочными стенками, для загрузки и выгрузки томатов из каждой секции имеются откидные дверцы. Высота слоя плодов в каждой секции не превышает расстояния между полками и составляет 230 мм. Масса контейнера составляет 95 – 100 кг, а количество томатов в контейнере 380 -400 кг [16]. С низу каркаса имеются бруски для удобной погрузки вилочным погрузчиком, а на верхней части имеются петли для строп грузоподъемного механизма.

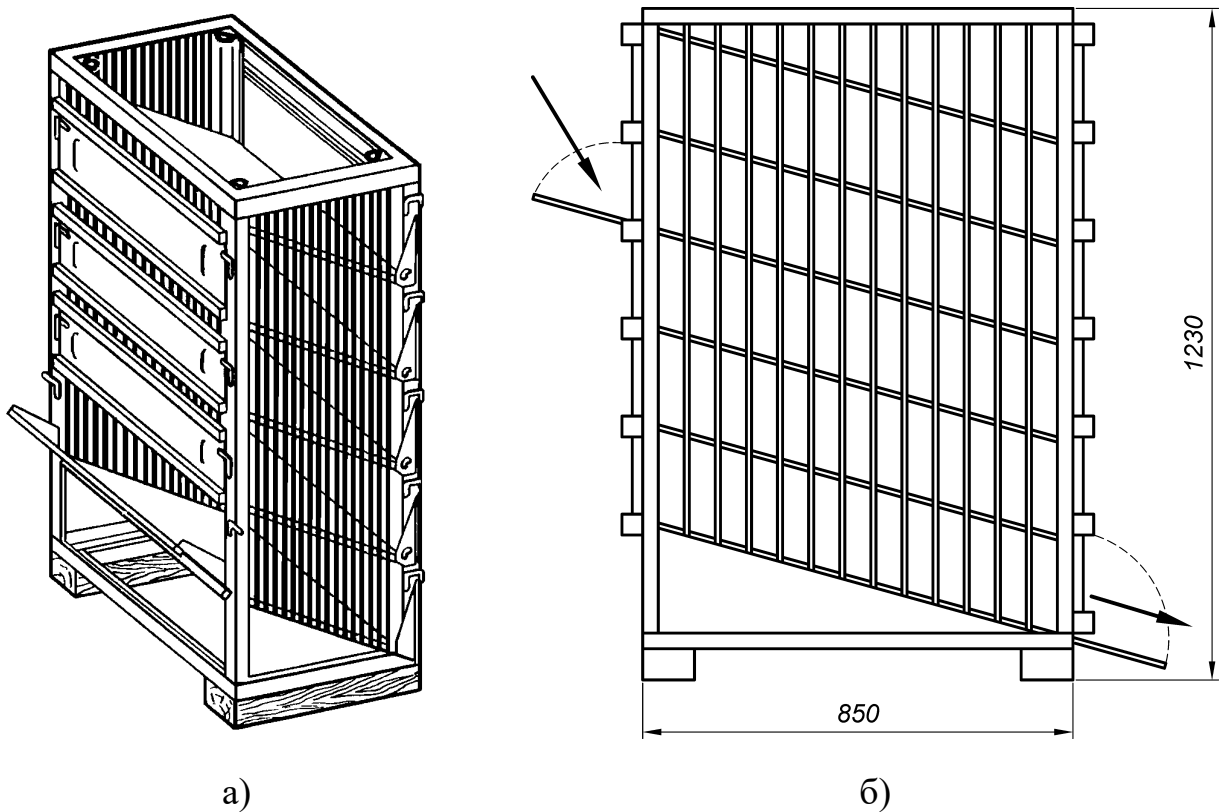


Рис. 1.4. Контейнер для томатов многократной выборочной уборки конструкции В.А. Каверина: а) общий вид; б) схематическое изображение.

С целью упрощения конструкции и повышение надежности предложен контейнер для вывозки томатов с поля, имеющий изогнутые полки разделяющие контейнер на ярусы (рис. 1.5) [23].

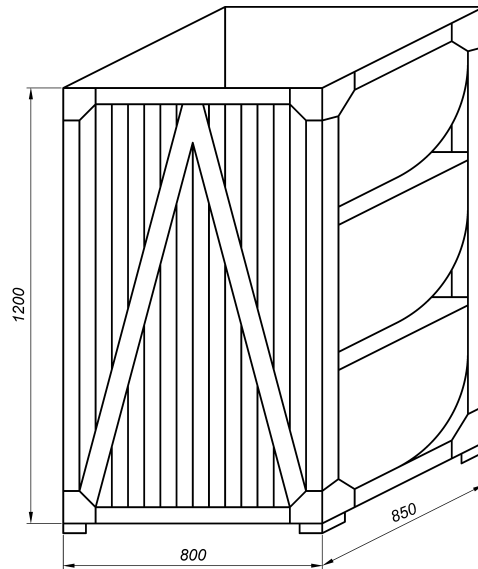


Рис. 1.5. Полочный контейнер конструкции завода „Октябрь” Молдовы.

Тенденция к расширению возможностей контейнеров не только для транспортирования и хранения плодоовощной продукции, но и возможность использовать их как торговое оборудование. Контейнер [24] (рис. 1.6.) предназначен для перевозки овощей и продажи их непосредственно с машины или на торговых площадках.

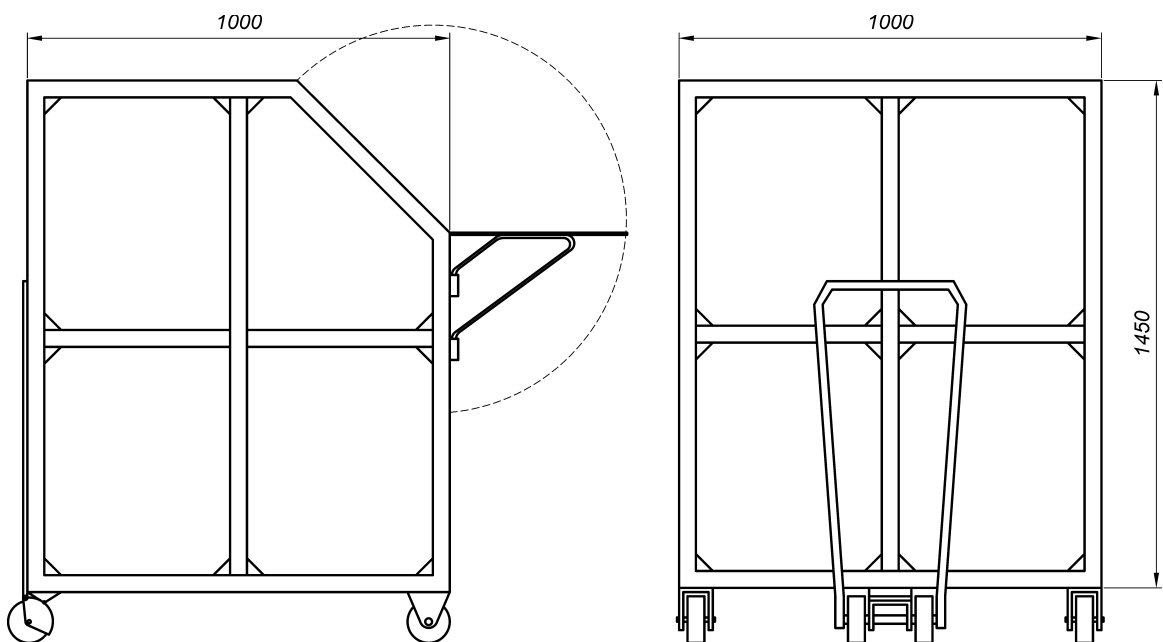


Рис. 1.6. Контейнер для перевозки овощей и продажи

Отличительной особенностью данной конструкции контейнера есть то, что каркас установлен на колесах, причем два передних смонтированы на поворотных кронштейнах для удобства перемещения в закрытых помещениях, а также для разгрузки овощей контейнер имеет две откидные крышки. Одна из крышек изготовлена из листовой стали и служит полкой для продажи овощей. Для погрузки и разгрузки самого контейнера к каркасу приварены стропильные петли. Имея габаритные размеры 1000x1000x1457 мм с объемом в 1,03 м<sup>3</sup>, контейнер применим для овощей имеющих большую твердость и способность выдерживать большие статические и динамические нагрузки.

В крупнотоннажных контейнерах и емкостях для уменьшения динамических воздействий на плоды применяются амортизирующие прокладки, укладываемые на дно. Представляет интерес применение для транспортировки томатов, яблок и других плодов, металлических или стеклопластиковых емкостей (гондол), устанавливаемых на автомобильных или тракторных прицепах грузоподъемностью 8 – 12 т. Размеры стеклопластиковой гондолы грузоподъемностью 12 т составляют в длину 7,2 м, в ширину 2,4 м и высота 0,9 м. Прокладка из поролона или губчатой резины, положенная на дно емкости, уменьшает на 30% количество поврежденных плодов за счет амортизации толчков и транспортных сотрясений [19]. В этом плане можно рассматривать и тенденцию создания мягких контейнеров из эластичных материалов, а также гибких оболочек-вкладышей для жестких контейнеров.

1.1.2. Применение эластичных элементов в конструкциях контейнеров. В Украине разработаны и выпускаются несколько типов мягких контейнеров для сельскохозяйственной и другой продукции [25]. Мягкий контейнер представляет собой емкость, выполненную из прорезиненной ткани с жесткими днищем и крышкой. В центре крышки расположен загрузочный люк. К днищу прикреплен разгрузочный резиновый рукав, закрываемый клапаном. Оболочка контейнера изготавливается из двух-трех слоев проре-

зиненной ткани. Эластичный материал оболочки обеспечивает стойкость к механическим и атмосферным воздействиям, допускает штабелирование контейнеров в три-четыре яруса. В порожнем состоянии контейнер компактно складывается, занимая объем 10 – 12% от загруженного.

Созданы гибкие контейнеры из ламинированной синтетической ткани, обладающей высокой химической стойкостью и прочностью. Оболочка контейнера имеет цилиндрическую форму, переходящую внизу в коническую воронку с разгрузочным патрубком. В верхней части оболочки имеется аналогичный загрузочный патрубок. Контейнер монтируется на круглой металлической подставке, которая позволяет поднимать и перемещать его вилочным погрузчиком. Верх оболочки снабжен стальной рамкой, предназначенной для подъема контейнера краном. Порожний контейнер складывается на подставке и занимает объем почти в 6 раз меньше загруженного [25].

Для перевозки корнеклубнеплодов с полей в хранилища удобен мягкий контейнер в виде мешка, изготовленного из капроновой или нейлоновой сетки [26]. Шнур, к которому присоединена сетка, образует в верхней части загрузочное отверстие. Аналогичное разгрузочное отверстие меньшего диаметра имеется в нижней части сетчатого контейнера. В загруженном состоянии отверстия зашнуровываются.

Фирма „Николон” выпускает мягкий контейнер типа „Никбэк” вместимостью до 1,5 тонны картофеля. Контейнер прямоугольной формы имеет четыре стенки, зашнуровываемую горловину и дно с разгрузочным зашнуровываемым отверстием. Две противоположные стенки выполнены из прочной полипропиленовой ткани. К ним в верхних углах пришиты четыре петли с 5-ти кратным запасом прочности для грузоподъемных механизмов. Две другие стенки изготовлены из мелкоячеистой полипропиленовой сетки, обеспечивающей хорошую вентиляцию картофеля при хранении. При загрузке картофелем контейнер размещается на поддоне или подвешивается при помощи петель к стойке со штырями. В таком положении

осуществляется хранение картофеля на плодоовощных базах, чем обеспечивается его хорошая сохранность.

Примером жесткой конструкции с гибким вкладышем может служить применяемый в Голландии контейнер, выполненный в виде легкого жесткого каркаса из гнутых тонкостенных трубок по форме ящичного поддона. Внутри каркаса помещен вкладыш - мешок из пластифицированной ткани, который при помощи колец крепится к верхней рамке каркаса [27]. Вкладыш открыт сверху и одна его стенка сделана откидной и крепится к неподвижной части мешка при помощи подпружиненной застежки, образуя разгрузочный клапан контейнера (рис. 1.7.). Такая конструкция обеспечивает существенное уменьшение собственной массы контейнера и амортизацию динамических воздействий на плоды.

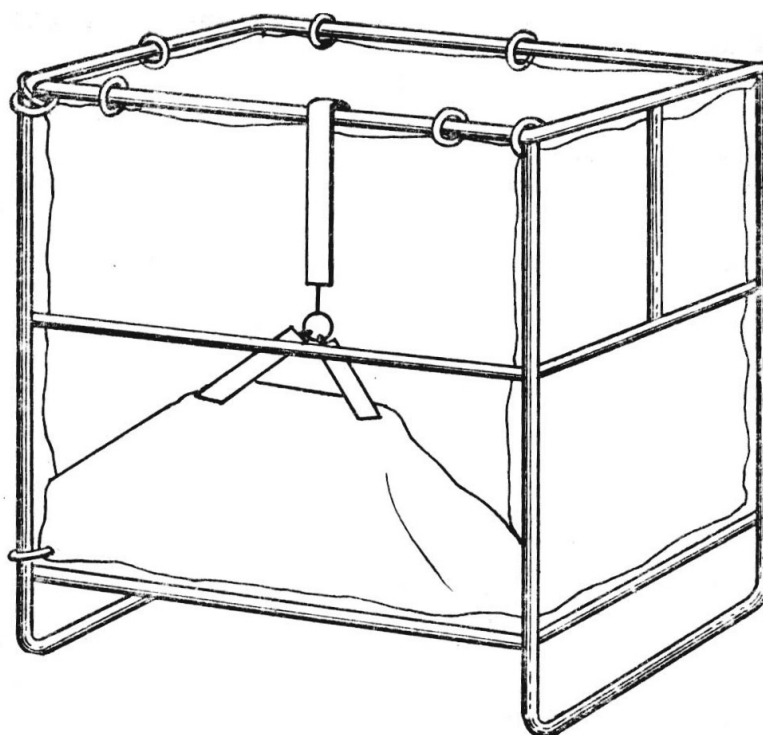


Рис. 1.7. Жесткий контейнер с мягким вкладышем

Предложен аналогичный контейнер решетчатый с внутренним вкладышем в виде мешка из пленочного синтетического материала, прикрепленного к картонным прокладкам [28]. Контейнер имеет решетчатые стенки, к

внутренним сторонам которых и к настилу поддона прикреплены листы гофрированного картона, предназначенные для защиты внутреннего вкладыша. Лист картона, образующий дно контейнера, имеет загнутые края, которые охватывают боковые стенки контейнера. Контейнер открыт для загрузки сверху. После загрузки верхняя часть вкладыша перевязывается или закрывается пленкой. Разгрузка контейнера производится опрокидыванием.

В Болгарии применяются складные контейнеры со стенками из капроновой сетки для транспортировки бахчевых культур. Вместимость контейнера 300 кг, собственная масса 36 кг [29].

Контейнер с жесткими наружными стенками и внутренними перегородками из полипропиленовой сетки предложен для транспортирования прорастающего семенного картофеля. Внутренние перегородки изогнуты так, что образуют ряд камер для размещения в них семенного картофеля. Такая конструкция обеспечивает надежную защиту ростков картофеля от повреждений и хорошую его аэрацию [30].

Для улучшения длительной сохранности плодов и овощей предложены контейнеры, конструкция которых обеспечивает подвод к внутренней плоскости охлаждающего воздуха и, по мнению авторов, может поддерживать необходимую для продолжительного хранения плодов и овощей температуру. Контейнер выполняется в виде прямоугольного каркаса с перфорированными стенками, двойным дном, образующим пространство для подвода воздуха, и с центральной перфорированной трубой для распределения воздуха по внутреннему объему контейнера [31, 32]. Однако, в этих контейнерах нагрузки на плоды и обусловленные ими повреждения могут оказаться сравнительно высокими, достигая 20 – 30% [16].

Стремление к укрупнению грузовых единиц с целью интенсификации ПРТС операций, необходимость сокращения потерь плодоовощной продукции при перевозках и расширении технологических возможностей транспортной тары в системах комплексной механизации уборочно-транспортных,



складских и торговых процессов обусловили современные тенденции развития и совершенствования контейнеров, отражающих достижения научно-технического прогресса в АПК.

## 1.2. Физико-механические свойства плодов и факторы, влияющие на их сохранность при транспортировании

Создание эффективного контейнера для томатов требует иного подхода, чем разработка транспортной тары и контейнеров для большинства других массовых видов сельскохозяйственной продукции. Особенность состоит в специфических свойствах томатов и необходимости учитывать множество факторов, влияющих на их сохранность при перевозках и имеющих различный, в том числе и вероятностный характер.

Овощи и фрукты очень чувствительны не только к атмосферным, но и к механическим, микробиологическим и другим воздействиям. Томаты и многие другие овощи и фрукты не допускают многократных перевалок и продолжительного хранения на промежуточных пунктах.

Изучению физико-механических свойств овощей и фруктов посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых [18, 33 – 41]. Наиболее полно изучалось сопротивление плодов (томатов, яблок, слив, перца и некоторых других) сжатию статической нагрузкой между двумя плоскими поверхностями, а также сопротивление проколу кожицы плунжером малого диаметра. Исследовались геометрические характеристики, аэродинамические, акустические, оптические свойства некоторых видов овощей и плодов.

Знание геометрических характеристик плодов имеет значение для проектирования рабочих органов обрабатывающих машин, разработки сепарирующих устройств. Исследование стойкости к раздавливанию и сопротивление проколу кожицы полезно при конструировании различных перерабатывающих устройств.

Использование аэродинамических и гидродинамических характеристик относится к исследованию функционирования и разработке пневматических и гидравлических транспортеров, а также процессов разделения плодов в жидкой среде. На результатах изучения акустических свойств могут основываться методы сортировки плодов. Оптические свойства положены в основу принципа работы оптической установки для сортировки томатов по степени зрелости.

Сопротивление плодов динамическим нагрузкам принято оценивать критической высотой или коэффициентом восстановления при падении плодов на определенную поверхность [33].

Лишь некоторые из установленных показателей физико-механических свойств, в частности, величина допустимой сжимающей нагрузки на плоды и допустимая высота падения плодов на данную поверхность могут быть использованы при создании транспортных средств для их перевозки. Совершенно недостаточно в этом плане изучены свойства большинства видов тепличных овощей. Выполненные в этом направлении исследования [42] посвящены преимущественно изучению свойств, характеризующих лежкость томатов.

Представляют интерес исследование механических свойств плодов цитрусовых с точки зрения их транспортабельности [43]. Изучалось повреждение плодов скороспелых мандаринов Уншиу статической, квазистатической и ударной нагрузкой.

Статическая нагрузка величиной от 20 до 60 Н создавалась специальным устройством при помощи пластин. Квазистатическая нагрузка прикладывалась к плодам посредством пластин и плунжеров диаметром 10 мм при скорости перемещения плунжера, варьирующей от 50 до 3000 мм/сек. Ударная нагрузка создавалась при падении плодов на бетонную поверхность. В результате проведения опытов было установлено, что статическая нагрузка свыше 55 Н вызывает деформацию плодов свыше 20 мм и их разрушение. На основании этого допустимая статическая нагрузка была принята равной 50 Н.

При этом отмечается, что при квазистатическом нагружении пластинами со скоростью 50 мм/сек стойкость плодов в 2 раза выше. Вместе с тем авторами не учтено влияние степени зрелости, размеров плодов и других факторов, обуславливающих вероятностный характер распределения показателей физико-механических свойств. Из полученных данных невозможно судить о стойкости плодов к вибрационным нагрузкам. Для мандаринов массой 0,12 кг установлена критическая высота падения равная 1,75 м. Однако, неубедительными представляются утверждения об уменьшении критической высоты падения с уменьшением массы отдельных плодов.

Таким образом, имеющиеся данные не достаточны для использования при создании транспортных средств и контейнеров. Поэтому одной из основных задач настоящей работы является исследование и статистическая обработка показателей физико-механических свойств плодов с учетом факторов, определяющих вероятностную природу этих показателей. При этом наибольший интерес для конструкторов представляют материалы, в которых имеются конкретные цифровые данные, сопоставимые с действующими на плоды статическими, вибрационными и ударными нагрузками.

Неблагоприятные соотношения механических воздействий на плоды и стойкости их к этим воздействиям могут привести к значительным повреждениям и потерям плодоовощной продукции. Поэтому конструирование контейнеров должно базироваться на достаточно достоверных данных о величине механических воздействий на плоды при транспортировании и выполнении погрузочно-разгрузочных операций. Эти данные принято определять эмпирически в виде экстремальных значений ускорений контейнера или платформы транспортного средства.

Исследованию ускорений при физическом моделировании вибраций посвящены работы М.О. Брайена, А.В. Четвертакова, К.Кода и др. [44 – 48].

В.С. Заводнов исследовал влияние неровностей дорожного профиля на параметры колебаний транспортного средства для установления допустимой скорости его движения [49].

В.А. Каверин получил экспериментальные и теоретические зависимости статической нагрузки от высоты слоя и плотности укладки плодов, вывел выражения передаточных функций контейнера, совершающего транспортные колебания, для аналитической оценки ударных и вибрационных транспортных воздействий [50]. Эти результаты свидетельствуют о целесообразности проведения исследований по определению конкретных значений механических воздействий на плоды при транспортировании и выполнении погрузочно-разгрузочных работ.

Одним из важнейших показателей, характеризующих товарные качества овощей и фруктов, является наличие механических повреждений плодов. Этот показатель жестко нормируется соответствующими стандартами. Стандарты на свежие овощи и фрукты регламентируют относительное количество и степень механического повреждения плодов как в местах их заготовки, так и в местах потребления. Это, в свою очередь, предъявляет высокое требование к транспортным средствам, таре и контейнерам.

Для определения степени соответствия технических средств предъявляемым требованиям необходима количественная оценка возможных повреждений и потерь транспортируемой продукции. В качестве причин повреждения плодов приводятся различные факторы. Некоторые авторы выделяют в качестве причин повреждения плодов и потерь их массы ботанический сорт плодов, их размеры, вид тары [51, 52]. В.А. Занозин, рассматривая целесообразность внедрения контейнерного способа доставки продукции, считает важным фактором потерь температуру внутри контейнера [53]. Разрыв во времени между сбором урожая и доставкой его на переработку признают в качестве существенного фактора повреждений и потерь плодов А.С. Короленко и другие [54]. Н. Букина, М. Тойбаев [55] считают в качестве основной причины повреждения плодов скорость движения транспортных средств. Оптимальными режимами перевозки томатов по асфальтированным дорогам считают скорости 25 и 60 км/час. По их мнению, изменение скорости в ту и другую сторону ведет к увеличению повреждения плодов.

М.О` Брайен [56] к наиболее существенным факторам повреждения томатов относит продолжительность транспортировки, температуру окружающей среды и силы действующие на плоды обусловленные высотой слоя и скоростью загрузки томатов в контейнеры.

Рассматривать степень и величину повреждений плодов как функцию механической нагрузки и прочности плодов предлагают Б. Херольд и другие [57], В.А. Каверин [58].

Сравнительные исследования повреждений и потерь томатов при производственных испытаниях и лабораторных исследованиях разрабатываемого контейнера необходимы для решения вопроса о пригодности его к практическому применению. Поэтому указанные исследования являются одной из важных задач диссертационной работы.

Свойства массовых видов плодоовощной сельскохозяйственной продукции различны. Так, корнеплоды характеризуются достаточно высокой механической прочностью, а томаты, косточковые плоды, ягоды отличаются невысоким сопротивлением механическим воздействиям. Физико-механические свойства овощей и фруктов существенно разнятся даже внутри одного вида в зависимости от ботанического сорта, условий произрастания и многих других факторов.

В последние годы селекционерами создано много сортов овощей и плодов, отличающихся хорошими технологическими качествами и пригодностью к машинной уборке. Особенно большая работа проделана по выведению новых сортов томатов и изучению их свойств. В результате были созданы перспективные применительно к машинной уборке и хорошо транспортабельные сорта томатов: Машинный 1, Бируинца, Ранний 83, Факел, Орбита [59, 60]. Сопротивление томатов этих сортов, раздавливанию статической нагрузкой, составляет от 27,0 до 40,0 Н. Показатели физико-механических свойств томатов различны не только у плодов разных сортов. Свойства плодов томатов одного сорта отличаются в зависимости от степени зрелости, размеров, формы и других факторов. Прочность плода зависит от

толщины кожицы. Установлено, что у мелких плодов кожица толще и прочнее, чем у крупных. Так, у мелких плодов диаметром 25...45 мм толщина кожицы равна 24,3...27,9 мкм, у крупных диаметром 65...85 мм толщина кожицы равна 18...21,7 мкм.[60].

Мелкие плоды имеют более высокую удельную прочность — усилие раздавливания, приходящееся на единицу массы плода. Еще большее различие в динамической прочности мелких и крупных плодов томатов.

Показатели сопротивления плодов динамическим нагрузкам принято оценивать либо числом ударов бойком, определенной массы, до появления видимых трещин, либо критической высотой падения плодов на некоторую поверхность. Критической считается высота, при сбрасывании с которой плоды получают видимые повреждения. В отличие от условного показателя числа ударов бойком, критическая высота падения представляет определенную практическую ценность, например, для установления допустимой высоты загрузочных устройств.

Исследованиями установлено, что томаты мелкоплодных сортов Новинка Приднестровья, Кросс, Оригинальный пригодны для механизированной уборки. Плоды этих сортов не получают видимых повреждений при падении на различные по жесткости поверхности с высоты до 1,0 м. В то же время, у такого сорта как Невский и некоторых других сортов отдельные зрелые плоды получают повреждения при сбрасывании их на деревянную поверхность с высоты 0,15...0,20 м [61, 62].

По сравнению с томатами, другие массовые виды овощей, такие как перец сладкий, баклажаны, кабачки, огурцы характеризуются более высокими прочностными свойствами и превосходят томаты по показателям сопротивляемости статическим сжимающим нагрузкам. Например, усилие сжатия сладкого перца до появления трещин составляет при сжатии по диаметру 74,0 Н, а по длине 60,0 Н, разрушающая нагрузка при сжатии баклажанов по диаметру превышает 400 Н, по длине 190 Н [62].

Высокими физико-механическими показателями характеризуются яблоки зимних сортов. Они обладают прочной кожицей и хорошо сопротивляются сжимающим статическим нагрузкам. Разрушающая статическая нагрузка на плоды некоторых поздних сортов яблок превышает 420 Н [63].

Таким образом, согласно имеющимся данным о транспортабельности различных плодов, разрабатываемый для перевозки томатов контейнер будет вполне пригоден и для транспортирования большинства других массовых видов овощей и фруктов.

Механизм повреждения плодов и овощей существенно отличается от механизма разрушения конструкционных материалов. Повреждение плодов и овощей обусловлено разрушением оболочек клеток и разрывом межклеточных связей. Поэтому большое влияние на стойкость плодов и овощей оказывает их внутренняя структура, которая характеризуется сложностью и нестабильностью. Стойкость зависит от состава клеток и оболочки, условий произрастания, степени зрелости при съеме и других факторов. В плодах и овощах после отделения от растения продолжают идти жизненные процессы, вызывающие изменение внутренней структуры. Важную роль играют наружные кутикулярные слои, которые являются барьером на пути проникновения микроорганизмов в ткань. При механических повреждениях резко усиливается интенсивность дыхания, а поврежденное место становится очагом развития микроорганизмов.

Существенной особенностью овощей и фруктов является высокое содержание воды, достигающее 80...90% [64]. Насыщенность клеток и тканей водой обуславливает повышенную склонность плодов, овощей и других видов сочного растительного сырья к потере веса и ухудшению качества за счет испарения влаги, возникновение условий для развития микроорганизмов и снижение устойчивости к механическим воздействиям.

Основная часть воды содержится в сочном растительном сырье в виде клеточного сока. Эта, так называемая свободная вода, связана с тканями растений непрочной и легко испаряется. Небольшая часть воды более прочно

удерживается растительными коллоидами и называется связанной. Остальную часть растительного сырья представляют растворимые и нерастворимые в воде сухие вещества. Нерастворимые сухие вещества составляют клеточные стенки и механические элементы тканей - целлюлоза (клетчатка) и сопутствующие ей гемицеллюлоза и протопектин, нерастворимые азотистые, минеральные вещества, крахмал, нерастворимые пигменты. Нерастворимые сухие вещества определяют консистенцию и механическую прочность тканей. Содержание нерастворимых сухих веществ в овощах и плодах обычно не превышает 25%. Растворимые сухие вещества содержатся в клеточном соке и составляют в среднем 5...18% [64].

Характер повреждения плодов и овощей зависит от способа приложения нагрузки. Сосредоточенная нагрузка создает прокол или порез оболочки плодов и овощей. Ударная нагрузка приводит к образованию вмятин или побитостей. Знакопеременная или циклическая нагрузка вызывает в стенках клеток явления усталости с последующим возникновением усталостных микротрещин, накопление которых приводит к возникновению видимых повреждений. Таким образом, стойкость плодов и овощей следует оценивать, как способность выдерживать без разрушения внешние механические воздействия.

Большинство выполненных ранее исследований физико-механических свойств овощей и фруктов отличает стремление получить вполне определенные детерминированные показатели. Однако, в силу неоднородности внутренней структуры плодов, вариации их размеров, формы, степени зрелости и влияния большого числа разнообразных случайных факторов, физико-механические свойства овощей и фруктов неизбежно носят вероятностный характер. Вполне очевидно, что все исследуемые плоды не могут иметь одно и то же значение показателя и можно достоверно утверждать лишь о некотором интервале этих значений.



Кроме того, некоторые хорошо изученные показатели физико-механических свойств являются в значительной мере условными. Например, сопротивление проколу кожицы плодов плунжером малого размера. Этот показатель удобен для сравнения прочности кожицы и консистенции мякоти плодов и для оценки технологических качеств, но не сопоставим с транспортными нагрузками. Несопоставимы с механическими воздействиями такие показатели, как эластичность кожицы, коэффициент восстановления при ударе и некоторые другие.

В то же время следует отметить, что многие районированные на Украине виды овощей и фруктов в плане сохранности их при перевозках изучались явно недостаточно. Особенно это относится к легкоповреждаемым видам плодов, томатам открытого и защищенного грунта.

Поэтому для получения конкретных данных, используемых при разработке транспортных средств или транспортной тары представляется необходимым выполнить исследование показателей свойств, которые могут быть сопоставимы с действующими на плоды нагрузками на различных операциях процесса доставки потребителям. Это, в первую очередь, стойкость плодов или сопротивление статическим и динамическим нагрузкам с учетом вероятностного характера показателей этих свойств.

### 1.3. Приборы для изучения разрушающих нагрузок плодов и овощей

Сопротивление сжимающим статическим нагрузкам означает способность томатов выдерживать эти нагрузки без разрушения. Такие нагрузки называются допустимыми. Сжимающие нагрузки, при которых в нагруженном образце начинают появляться трещины на кожице, принято считать травмирующими или разрушающими.

Плоды томатов, как и многие другие овощи и фрукты, подвергались изучению их сопротивляемости статическим сжимающим нагрузкам. Выпол-

нялись исследования упругости плодов, контактных напряжений, модуля продольной упругости, разрушающих нагрузок [65 ... 68].

Для исследования прочности кожицы плодов и сопротивления их раздавливающим нагрузкам создано большое количество разнообразных приборов, приспособлений и устройств [69].

Наибольшее распространение в селекционных исследованиях получили: прибор ОПТ-10, созданный в НИИ овощного хозяйства, и экстензометр ЭТ-5 ВНИИ сельскохозяйственного машиностроения [34].

Прибор ОПТ-10 представляет собой шток с диском на нижнем конце, передающим сжимающее усилие на образец, помещенный на столе прибора. Нагрузка создается грузом, устанавливаемым на верхнем конце штока.

Экстензометр состоит из основания двух вертикальных стоек, двух зажимов и силового механизма. В зависимости от прочности и твердости испытуемых плодов в экстензометре используются сменные силоизмерительные балочки различной жесткости и, соответственно, разные интервалы испытательной нагрузки.

Прибор с рычажным силовым механизмом для сжатия фруктов применен Украинским НИИ садоводства [70]. Прибор представляет собой рычаг, один конец которого шарнирно крепится к вертикальной стойке. Шарнирная опора имеет возможность перемещаться по стойке для настройки на требуемый размер. В средней части рычаг опирается на эксцентрик, а второй конец снабжен круглой пятой, передающей нагрузку на испытуемый образец. Сжимающая нагрузка создается подвижным грузом как на рычажных весах.

В Армянском НИИ сельского хозяйства разработан прибор, в котором регистрация сжимающих усилий осуществляется шлейфовым осциллографом [71]. В качестве датчика нагрузки служат две индукционные катушки, сердечник которых связан со штоком, нагружающим образец сжимающей нагрузкой.

Х. Гёлих, Н. Мозенин использовали прибор с гидropневматическим силовым цилиндром и регулятором скорости. Измерение усилий и напряжений в исследуемых образцах выполняется при помощи тензодатчиков [72].

Создавались и другие аналогичные приборы и приспособления, в том числе и сложные по своей конструкции, с регулированием и регистрацией скорости нагружения. Многие из них громоздки и неприспособлены для полевых условий. Обычно такие приборы создавались для решения определенных задач и изготавливались в единичных экземплярах.

## ВЫВОДЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Основные направления и тенденции применения и совершенствования конструкций контейнеров, установленные на основе анализа литературных источников и учитываемые в настоящей работе:

- переход от ящичного оборудования к контейнерному, что, прежде всего, характерно для массовых перевозок плодоовощной продукции;
- расширение технологических возможностей контейнеров за счет выполнения ими не только транспортных, но и функций уборочного, складского и торгового оборудования;
- создание секционных, многоярусных контейнеров, способствующих уменьшению высоты слоя плодов;
- все более широкое применение каркасных конструкций контейнеров с емкостями из эластичных материалов. Такое решение применяется для уменьшения собственной массы контейнеров, защиты груза от атмосферных воздействий и демпфирования механических нагрузок;
- применение в конструкциях контейнеров амортизирующих приспособлений и других решений, обеспечивающих снижение уровня динамических воздействий на транспортируемые плоды;
- применение мягких эластичных вкладышей в жестких контейнерах позволяет повысить сохранность плодов при транспортировании и не требует внесения изменений в конструкцию самого контейнера;

2. Основными физико-механическими свойствами плодов овощей и фруктов, влияющих на эффективность транспортирования являются: размеры, вес, плотность, толщина и прочность кожицы, сопротивляемость статическим и ударным нагрузкам. Спецификой перечисленных характеристик является их вариабельность по отношению к биологическому виду плодов, их сорту и даже к отдельным плодам одного сорта.

3. Из всей плодоовощной продукции томаты являются наименее транспортабельными и поэтому разработка специальной тары для них одновременно является наиболее актуальной и сложной задачей.

Учитывая выше изложенные выводы, **целью настоящей работы является:** уменьшение потерь томатов при их перевозках из мест производства к потребителям, за счет использования в качестве транспортной тары многоярусных контейнеров, содержащих устройства снижающие динамические воздействия на плоды.

Достижение такой цели предполагает **выполнение следующих задач:**

- выполнить исследование физико-механических свойств плодов районированных сортов томатов открытого и закрытого грунта, характеризующих их стойкость к статическим и динамическим воздействиям;
- разработать математические модели механизмов разрушения плодов томатов в процессе их внешнего нагружения;
- провести математическое моделирование силового воздействия на плоды, в ситуациях которые возникают при их транспортировании с применением контейнерной или ящичной тары;
- учитывая современные тенденции в совершенствовании ящичной и контейнерной тары, а также, опираясь на результаты математического моделирования, согласовать конструкцию и параметры контейнера, позволяющие минимизировать потери томатов в процессе их транспортирования;
- с целью оценки повреждаемости плодов, провести лабораторные и производственные испытания разработанной конструкции многоярусного каркасного контейнера с эластичными секциями;
- провести технико-экономическую оценку предложенной конструкции контейнера при транспортировании томатов.

## РАЗДЕЛ 2

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ ФОРМЫ ПЛОДОВ ТОМАТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Разработка новых эффективных методов и средств транспортирования томатов, позволяющих минимизировать повреждения продукции, невозможно без изучения причин и механизмов появления этих повреждений. Та часть причин повреждений, которая лежит в плоскости инженерных знаний, очевидна — это взаимодействие плодов между собой и стенками тары. При этом неизвестен «механизм» появления повреждений. Его изучение задача далеко не тривиальная, требующая применения достаточно сложных математических моделей и методов.

#### 2.1. Общие положения из теории пластичности

В настоящей работе мы ограничимся представлением о плодах томатов как об округлых телах, состоящих из весомой сплошной неупругой пластической среды [73-77]. В таком случае среду, составляющую тело плодов томатов, можно характеризовать удельным весом  $\gamma$  и пластической постоянной  $k$  [78].

Всякий раз, когда плоды томатов претерпевают внешнее механическое воздействие, напряженное состояние, которое возникает в их объеме, условимся соотносить со статическим состоянием пластичности, которое характерно тем, что в каждой точке среды имеется, по меньшей мере, одна элементарная площадка, на которой касательное напряжение достигает своего критического значения

$$\tau_{\max} = k . \quad (2.1)$$

Данное требование (2.1) называют условием пластичности [78].

Касательно формы плодов томатов уточним — под округлыми телами условимся понимать такие, которые в содержащем вектор весовых сил сечении изначально (до нагружения) имеют круглую форму, то есть это могут

быть как сферические тела, так и цилиндрические, ориентированные горизонтально, бесконечной длины.

Почему сферические — понятно. Ведь плоды томатов именно такие и есть. А вот почему цилиндрические — это вопрос, который в дальнейшем подлежит подробному пояснению. Забегая наперед, скажем только, что для сферических тел нет пока удобной математической модели пластичности. Вот и получается, что в ходе вычислительных экспериментов можно прибегнуть либо к более точной интерпретации формы изучаемого объекта и при этом использовать недостаточно адекватные модели пластичности, либо пожертвовать адекватностью формы, но за счет этого применить более точные модели пластичности. Какой путь в итоге окажется точнее — следует изучить.

Для расчета параметров напряженного состояния пластичности воспользуемся работами [79 - 87]. При этом имеем ввиду, что на уровне математических моделей теории пластичности сплошных неупругих пластических сред и предельного равновесия сплошных неупругих идеально-связных сред совпадают.

Напряженное состояние среды, которое возникает в каждой точке области пластичности, в частности, можно описать посредством определенного в ортогональной декартовой системе координат  $Oxyz$  тензора напряжений. Его нормальные компоненты —  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  и  $\sigma_{zz}$ , а касательные —  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{yz}$ . Главные нормальные напряжения обозначим  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , причем условимся ранжировать их следующим образом:  $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$  [79], т.е. чем больше напряжение, тем больше его индекс.

Что касается знаков нормальных напряжений, то условимся считать их положительными, если они сжимающие [79]. В отношении знаков касательных напряжений правило формулировать не будем, а условимся уточнять их всякий раз, как нам это будет необходимо [88].

Решение задачи в дальнейшем, используя правую двумерную декартову систему координат  $Oxyz$ , будем сводить к плоской постановке. Это связа-

но с тем, что в настоящее время плоские задачи предельного напряженного состояния [79-85, 87] и теории пластичности [78] научной общественностью исследованы существенно полнее, в результате чего их решение с применением последних известных методик [80-85,87] дает более точное представление об изучаемых объектах, чем аналогичные задачи и решения в объемной постановке. Именно с проблемой сведения изучаемой задачи о деформировании нагруженного плода томата к плоской постановке связаны упомянутые выше рассуждения касательно выбора формы модельного тела.

Как бы ни было, трехмерный случай мы не рассматриваем, и в последующем компоненты тензора напряжений  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{yz}$  нас интересовать не будут. Останется без рассмотрения и среднее главное нормальное напряжение  $\sigma_2$ , в отношении которого используя работу [79], положим, что

$$\vec{\sigma}_2 \perp [Oxy], \quad \sigma_2 \in [\sigma_1, \sigma_3], \quad (2.2)$$

где:  $[Oxy]$  — координатная плоскость  $Oxy$  системы координат  $Oxyz$ ;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , — главные нормальные напряжения, которые рассматриваются как функции двух координат  $x$ ,  $y$ . Следовательно, величина  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  от значения  $z$  не зависит. Это означает, что напряженное состояние среды не меняется с изменением координаты  $z$ . В данном случае оставляем за собой право рассматривать ближайшие окрестности  $z = z_0$ , не анализируя оставшееся пространство.

Ориентацию векторов главных нормальных напряжений  $\sigma_1$ , и  $\sigma_3$  определим посредством угла  $\varphi$ , который составляет линия действия вектора  $\sigma_3$  с осью абсцисс координатной системы  $Oxy$  [79], а ориентацию самой координатной системы — посредством угла  $\alpha$  между осью ординат и вектором силы веса среды.

Учитывая вышеизложенное и введя полусумму главных нормальных напряжений

$$s = \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \quad (2.3)$$



[79], интересующие нас компоненты тензора напряжений можно определить посредством следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= s + k \cos 2\varphi, \\ \sigma_{yy} &= s - k \cos 2\varphi, \\ \sigma_{xy} &= k \sin 2\varphi\end{aligned}\quad (2.4)$$

[79], а напряженное состояние в пределах области пластичности описать системой [79]:

$$\begin{aligned}\cos\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial s}{\partial x} + \sin\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial s}{\partial y} \mp 2k \left[ \cos\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sin\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] = \\ = \gamma \left[ \sin \alpha \cos\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) + \cos \alpha \sin\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) \right]\end{aligned}\quad (2.5)$$

Квазилинейная система уравнений (2.5) относится к гиперболическому типу [87]. Ее характеристическое решение известно [79]. Оно представляет собой уравнения характеристик (линий скольжения)

$$\cos\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) dy - \sin\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) dx = 0 \quad (2.6)$$

и выполняющиеся на них соотношения

$$ds \mp 2k d\varphi = \gamma [\sin \alpha dx + \cos \alpha dy], \quad (2.7)$$

которые могут быть интегрированы

$$s \mp 2k\varphi = \gamma [x \sin \alpha + y \cos \alpha] + \begin{cases} \lambda_1, \\ \lambda_2, \end{cases} \quad (2.8)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  — постоянные интегрирования (параметры характеристик).

Соотношения (2.8) в конечном итоге дают

$$s = \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} + \gamma(x \sin \alpha + y \cos \alpha), \quad (2.9)$$

$$\varphi = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{4k}. \quad (2.10)$$

В отношении характеристик (2.6) можно сказать, что они образуют криволинейную ортогональную сетку. Этот тезис непосредственно следует из (2.6). Свойства линий скольжения известны и хорошо изучены [78,89].

Далее, имея ввиду частный случай при

$$\alpha = 0, \quad (2.11)$$

что соответствует такой ориентации системы координат  $Oxy$ , когда ее ось абсцисс ориентирована горизонтально слева направо, а ось ординат — вертикально вниз и, воспользовавшись работами [80,82-84,87], запишем комплект соотношений, удовлетворяющих системе уравнений (2.5) и выполняющихся на координатных прямых, т.е. линиях параллельных осям принятой координатной системы.

Соотношения на абсциссе (выполняются вдоль линий, параллельных координатной оси  $Ox$ ):

$$x|_{y=\text{const}} = 2k \exp \frac{\gamma y - \tilde{C}_y}{2k} \text{ctg } \varphi + C_y^*, \quad (2.12)$$

$$s|_{y=\text{const}} = k \ln(\sin^2 \varphi) + C_y^+, \quad (2.13)$$

где

$$\varphi \in ]\varphi_{x_0} - \frac{1}{2}\pi, \varphi_{x_0} + \frac{1}{2}\pi[, \quad \varphi_{x_0} = \pm \frac{1}{2}\pi, \quad (2.14)$$

$$C_y^+ = \tilde{C}_y + k \ln(2(C^\nu)^2), \quad (2.15)$$

$\tilde{C}_y$ ,  $C_y^*$ ,  $C_y^+$  и  $C^\nu$  — постоянные величины.

Соотношения на ординате (выполняются вдоль линий, параллельных координатной оси  $Oy$ ):

$$y|_{x=\text{const}} = (-1)^r 2k \exp \frac{-\tilde{C}_x}{2k} \text{tg } \varphi + C_x^*, \quad (2.16)$$

$$s|_{x=\text{const}} = k \ln(\cos^2 \varphi) + \gamma y + k \ln(2(C^\nu)^2) + \tilde{C}_x, \quad (2.17)$$

$$s|_{x=\text{const}} = k \left[ \ln(\cos^2 \varphi) + (-1)^r 2\gamma \exp \frac{-\tilde{C}_x}{2k} \text{tg } \varphi \right] + C_x^+, \quad (2.18)$$

где

$$\varphi \in ]\varphi_{x_0} - \frac{1}{2}\pi, \varphi_{x_0} + \frac{1}{2}\pi[, \quad \varphi_{x_0} = \pm \frac{1}{2}\pi, \quad (2.19)$$

$$r = \begin{cases} 1 & \text{при } \varphi > \varphi_{x_0}, \\ 2 & \text{при } \varphi < \varphi_{x_0}, \end{cases} \quad (2.20)$$

$$C_x^+ = \gamma C_x^* + k \ln(2(C^\nu)^2) + \tilde{C}_x, \quad (2.21)$$

$\tilde{C}_x$ ,  $C_x^*$ ,  $C_x^+$  — постоянные величины.

Приведенные соотношения ((2.12)-(2.15)) и ((2.16)-(2.21)) по сути являются аналогами соотношений на линиях скольжения (2.8), с той лишь разницей, что последние выполняются вдоль кривых (2.6), положение которых

изначально (до решения задачи) не известно, в то время как положение координатных прямых известно всегда.

Используя соотношения на абсциссе (2.13) и выражения (2.4) в работе [87], получаем зависимости компонентов тензора напряжений от угла  $\varphi$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \end{pmatrix} = k [\ln(\sin^2 \varphi) \pm \cos 2\varphi] + C_y^+, \quad (2.22)$$

$$\sigma_{xy} = k \sin 2\varphi,$$

которые выполняются вдоль координатных прямых  $y = const$ .

## 2.2. Постановка задачи о взаимодействии плодов томатов с жестким плоским деформатором

**Условие.** Округлый плод томатов 1 (рис. 2.1) нагружен двумя горизонтальными жесткими поверхностями (деформатором 2 и опорной поверхностью 3), расстояние между которыми равно  $h$ . Интенсивность сжимающего воздействия определяется силой  $P$ . Величина трения покоя между деформатором 2 и плодом 1 определяется коэффициентом внешнего трения  $f$ . Диаметр (ширина)  $d$  пятна контакта томата 1 с деформатором 2 и диаметр (ширина)  $D$  плода томата в его центральном горизонтальном сечении меняются соразмерно величине расстояния  $h$  между деформатором 2 и опорной поверхностью 3. Криволинейные части  $L^dL^u$  и  $R^dR^u$  контура осевого (по  $Oy$ ) сечения плода томата не определены, т.е. радиус их кривизны  $r$ , вероятно, не имеет фиксированной точки приложения и не является постоянным значением для различных участков  $L^dL^u$  и  $R^dR^u$ .

*Принятые допущения:*

а) важнейшим из допущений является предположение о том, что напряженное состояние находящегося под нагрузкой плода томата с достаточной для практики точностью описывается теорией пластичности и/или предельного равновесия [80-85, 87] сплошных неупругих сред (пластической и/или идеально связной).

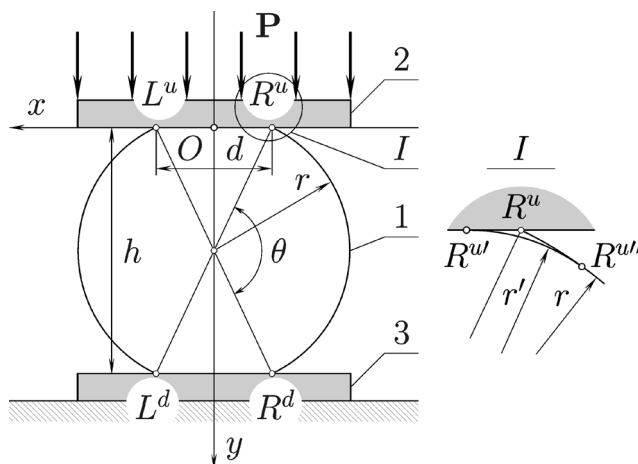


Рис. 2.1 Схема взаимодействия плода томата с жестким плоским деформатором: 1 — плод; 2 — деформатор; 3 — опорная поверхность

б) округлый плод томата условимся подменять модельным телом изначально (до нагружения) сферической или цилиндрической формы. Во втором случае предполагается, что цилиндр имеет бесконечную длину и ориентирован горизонтально. В любом случае в вертикальном сечении упомянутые два модельных тела представляются одинаково (рис. 2.1). Эти варианты мы рассмотрим последовательно с тем, чтобы определиться, какой из них более точно описывает изучаемый объект.

в) геометрия модельного тела (плода томата) и поле его напряжений остаются симметричными относительно горизонтального сечения, проходящего через центральную точку  $C$ , в частности, верхнее  $L^u R^u$  (с деформатором 2) и нижнее  $L^d R^d$  (с опорной поверхностью 3) пятна контакта модельного тела (плода томата) 1 имеют одинаковую форму равного диаметра (ширины)  $d$ ;

г) несмотря на то, что фактически свободные криволинейные поверхности модельного тела (плода томата)  $L^d L^u$  и  $R^u R^d$  с радиусом кривизны  $r$  сопрягаются с плоскими пятнами контакта  $L^u R^u$  и  $L^d R^d$ , например, в окрестностях точки  $R^u$  по некоторой дуге  $R^{u'} R^{u''}$  существенно меньшего радиуса  $r' \ll r$ , этим обстоятельством пренебрегаем и в дальнейшем считаем, что точки  $R^{u'}$ ,  $R^{u''}$  сливаются в одну точку  $R^u$ , когда  $r' \rightarrow \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — бесконечно малая величина. Но, тем не менее, радиус сопряжения  $r'$  существует, а значит, сопряжение между свободными поверхностями  $R^u R^d$  и пятном контакта  $L^u R^u$  выпол-

няется по касательной, т.е. без явного излома. Также обстоят дела и с другими точками  $L^u$ ,  $L^d$  и  $R^d$  сопряжения свободных криволинейных поверхностей  $L^dL^u$  и  $R^uR^d$  с плоскими пятнами контакта  $L^uR^u$  и  $L^dR^d$ ;

д) при увеличении интенсивности силового воздействия  $P$  и соответствующего уменьшения расстояния  $h$  согласованное изменение величин  $r$ ,  $d$  и  $D$  происходит таким образом, что площадь  $S_0$  поперечного сечения модельного тела (плода томата) и его объем  $V_0$  остаются неизменными.

*Начальные значения* (до нагружения, когда  $P = 0$ ) величин  $h$ ,  $r$ ,  $d$  и  $D$ , обозначим соответственно  $h_0$ ,  $r_0$ ,  $d_0$  и  $D_0$ . Очевидно, что  $h_0 = D_0 - 2r_0$ , а  $d_0 = 0$ .

**Требуется** определить пластическую постоянную  $k$  и смоделировать напряженное состояние, которое возникает в объеме плода во взаимосвязи с величиной интенсивности внешнего воздействия (распределенной силы  $P$ ).

### 2.3. Формулировка граничных условий трения, действующих в пределах пятен контакта

Воспользовавшись работой [84], сформулируем условия трения, выполняющиеся на контуре плода томата. Очевидно, что касательные напряжения, возникающие на элементарных площадках в приповерхностном слое, уравновешиваются силами трения, действующими на ближайших внешних параллельных им поверхностях. Следовательно, первые не могут превышать последних, а значит для верхнего  $L^uR^u$  и нижнего  $L^dR^d$  пятен контакта записываем:

$$|\sigma_{xy}| \leq f_u \sigma_{yy}, \quad |\sigma_{xy}| \leq f_d \sigma_{yy}, \quad (2.23)$$

где  $f_u$  и  $f_d$  — коэффициенты внешнего трения с плодом томата соответственно деформатора и опорной поверхности. Поскольку, по условию задачи,

$$f_u = f_d = f, \quad (2.24)$$

использовав выражения (2.22), для обеих пятен контакта имеем

$$s \geq k \left( \frac{|\sin 2\varphi|}{f} + \cos 2\varphi \right). \quad (2.25)$$

Обозначим  $\tau_l$  и  $\tau_r$  касательные напряжения, действующие на элементарных площадках, составляющих левую  $L^u L^d$  и правую  $R^u R^d$  части свободного контура. Поскольку на последних трения, естественно, нет, то справедливо условие

$$\tau_l = 0, \quad \tau_r = 0. \quad (2.26)$$

Заметим, что напряжения  $\tau_l$  и  $\tau_r$  с касательными компонентами  $\sigma_{xy}$  тензора напряжений (2.4) не совпадают, поскольку они действуют на площадках разной ориентации. В этом случае граничные условия (2.25) и (2.26) не охватывают ближайшие окрестности переходных точек  $L^u$ ,  $L^d$  и  $R^u$ ,  $R^d$ . Ведь ранее мы условились, что переход от пятна контакта к свободному контуру (например, в пределах окрестностей точки  $R^u$  (рис. 2.1)) осуществляется по бесконечно малому радиусу  $r' \rightarrow \varepsilon$ . Это обстоятельство следует и можно учесть, положив, что области действия условий (2.25) и (2.26) общих точек не имеют и, тем более, не пересекаются.

#### 2.4. Анализ закономерностей ориентации главных напряжений и главных площадок в объеме и у поверхности плода томата

Начиная анализ закономерностей изменения ориентации главных напряжений и главных площадок в пределах внешних поверхностей плода томата напомним, что на данном этапе мы еще не можем определиться с формой модельного тела. Какая она есть — сферическая или цилиндрическая. Рассмотрим две перечисленные модельные формы.

Общим для них является то, что на их свободном контуре отсутствуют касательные напряжения, следовательно, свободный контур составляют главные площадки и можно утверждать, что на свободном контуре векторы двух главных нормальных напряжений ориентированы по касательной к поверхности, а векторы третьего — по нормали к ней, правда, формально, ведь его модуль равен нулю. В отношении ориентации главных площадок, на ко-

торых действуют главные нормальные напряжения, ориентированные по касательной к поверхности свободного контура, можно сказать, что они ориентированы по нормали к свободному контуру.

На рис. 2.2, 2.4 и 2.5 сферическое и цилиндрическое модельные тела представлены в основной ортогональной системе координат  $Oxyz$ . Ориентация ее осей соответствует таковой на рис. 2.1, а точка привязки смещена и совпадает с центрами тяжести модельных тел.

Местные вырезы модельных тел соотнесены с локальной (вспомогательной) также ортогональной системой координат  $O'x'y'z'$ , положение и ориентация которой может меняться от рисунка к рисунку и даже в пределах одного рисунка. Например, на рис. 2.2А в случае выносного показа элементарного кубика система  $O'x'y'z'$  для удобства изображена с поворотом.

Главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , действующие на гранях этого кубика, с целью упрощения рисунка изображены только с видимой стороны, а не парами, что соответствовало бы действительности. Как соотносятся между собой главные напряжения, иллюстрируют диаграммы Мора. На них нормальные напряжения соотнесены с осью  $\sigma_{vv}$ , а касательные — с  $\sigma_{vt}$ .

Размеры элементарного кубика  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  на рисунках не показаны. В случае предельного перехода, т.е. когда  $\Delta x \rightarrow 0$ ,  $\Delta y \rightarrow 0$  и  $\Delta z \rightarrow 0$ , предполагается, что кубик согласованно стягивается в точку  $O'$ .

2.4.1. Сферическое модельное тело. Трехмерный случай. Что касается напряженного состояния модельного тела сферической формы (рис. 2.2), предполагается, что рассматриваемое напряженное состояние симметрично относительно любой вертикальной плоскости, проходящей через центр тяжести модельного тела. Можно надеяться, что в таком случае напряженное состояние будет удовлетворять условиям (2.2) плоской задачи. Так ли это увидим в процессе анализа.

Начнем с пятна контакта. Рис. 2.2А иллюстрирует напряженное состояние в ближайших окрестностях его центральной точки  $O'$ .

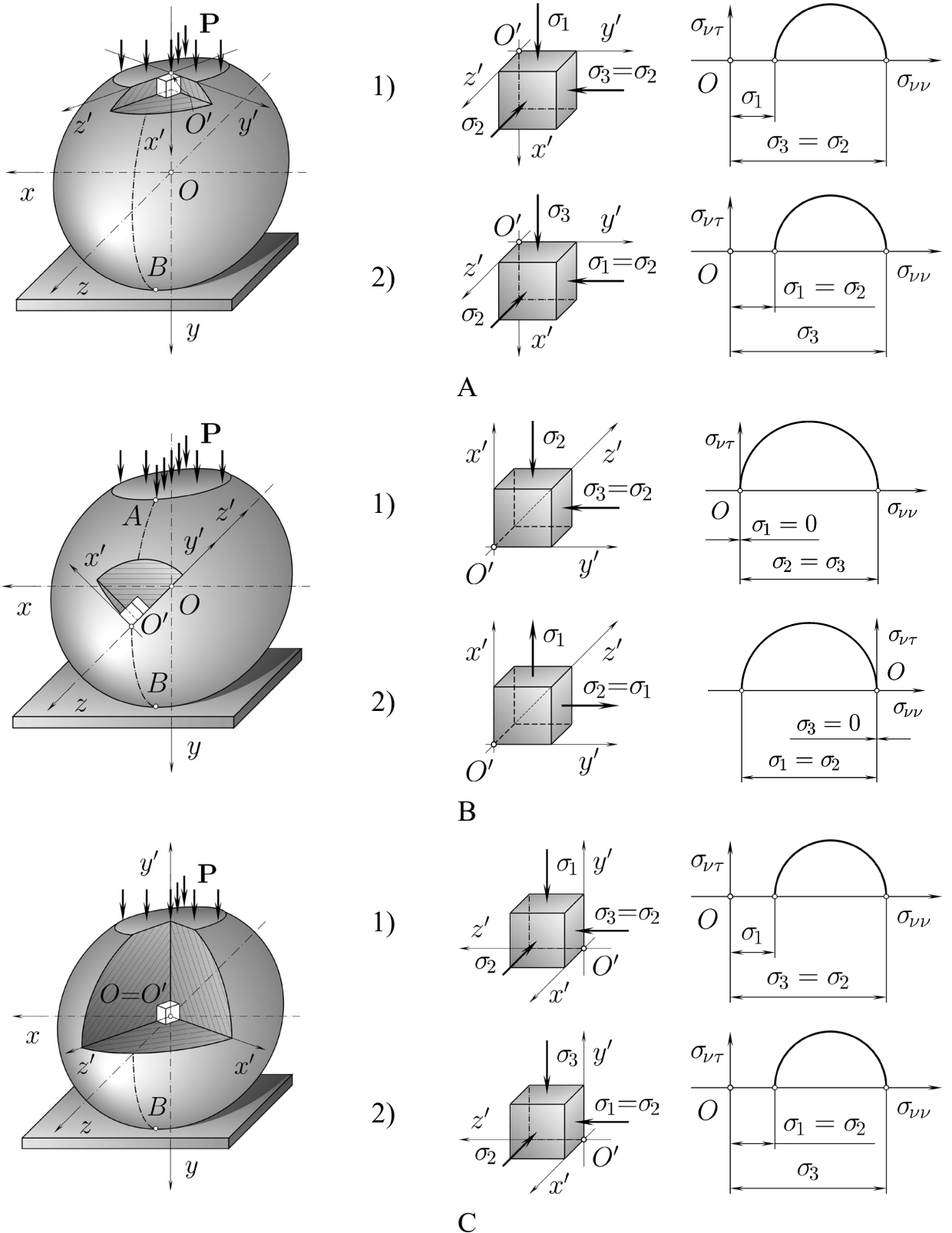


Рис. 2.2. Ориентация главных площадок и векторов главных нормальных напряжений в различных точках объема сферического модельного тела, находящегося в состоянии пластичности. Предполагается, что напряженное состояние модельного тела симметрично относительно любой вертикальной плоскости, проходящей через его центр тяжести.



Очевидно, что на внешней поверхности в точке  $O'$  касательные напряжения отсутствуют. Это означает, что и сама внешняя поверхность и напряжение, действующее на ней, являются главными. Также очевидно, что два других главных напряжения, действующих в точке  $O'$ , равны между собой, а главные площадки, на которых они действуют, ориентированы по нормали к пятну контакта, т.е. содержат (с учетом предельного перехода) ось  $O'x'$  или, что то же, ось  $Oy$ . Угол поворота этих площадок вокруг упомянутых осей является неопределенным. Но, тем не менее, мы имеем право сориентировать их так, чтобы оси  $O'y'$  и  $O'z'$  стали равнонаклонными к плоскости  $Oyz$ .

Кроме этого очевидно, что все главные напряжения являются сжимающими (положительными), а в отношении величины их модулей могут быть два варианта: 1) на внешней поверхности действует наименьшее главное напряжение  $\sigma_1$ , а два других  $\sigma_2 = \sigma_3$  — на внутренних (рис. 2.2A1); 2) на внешней поверхности действует наибольшее главное напряжение  $\sigma_3$ , а два других  $\sigma_1 = \sigma_2$  — на внутренних (рис. 2.2A2).

Ответить на вопрос, какой из предложенных вариантов является более достоверным, опираясь на классические теории пластичности [89] и/или предельного равновесия [79], не представляется возможным. Проиллюстрируем это утверждение, обратившись к рис. 2.3, на котором изображено вертикальное сечение элементарного конуса, построенного в окрестностях изучаемой центральной точки  $O'$  пятна контакта.

Поскольку сейчас мы не знаем, какое из главных напряжений действует на пятне контакта  $\sigma_1$  или  $\sigma_3$ , то на рис. 2.3 оно обозначено как  $\sigma_i$ , где  $i$  подразумевается равным единице или трем. На боковых поверхностях элементарного конуса (далее конуса), которые полностью состоят из площадок скольжения, действует касательные и нормальные напряжения [78,79,87,89]

$$\tau = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2}; \quad i, j = 1,3; \quad i \neq j, \quad (2.27)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}; \quad i, j = 1,3; \quad i \neq j. \quad (2.28)$$

Среднее (формально) главное напряжение  $\sigma_2$  мы не используем, поскольку в данном случае оно равно  $\sigma_1$  или  $\sigma_3$ .

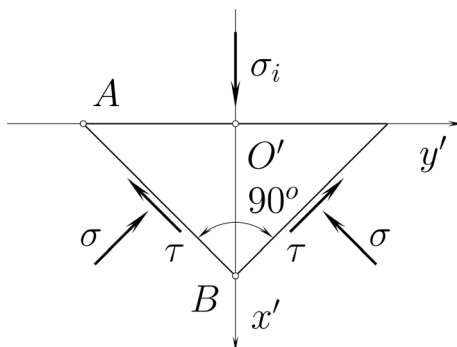


Рис. 2.3. Сечение элементарного конуса

Запишем для конуса уравнение силового баланса

$$\pi r^2 \sigma_i = (\tau \cos 45^\circ + \sigma \cos 45^\circ) \pi r l, \quad (2.29)$$

где:  $r$  — длина отрезка  $O'A$  (радиуса основания конуса);

$$l = \frac{r}{\cos 45^\circ} \quad (2.30)$$

— длина отрезка  $AB$  (образующей конуса);  $\pi r^2$  — площадь основания конуса;  $\pi r l$  — площадь боковой поверхности конуса.

С учетом определения (2.30), уравнение (2.29) преобразуется к виду

$$\sigma_i = \tau + \sigma. \quad (2.31)$$

В конечном итоге, после подстановки выражений (2.27) и (2.28), последнее уравнение (2.31) приводится к тождеству

$$\sigma_i \equiv \sigma_i, \quad (2.32)$$

из которого следует, что  $\sigma_i$  может быть равным как наименьшему из главных нормальных напряжений  $\sigma_1$ , так и наибольшему  $\sigma_3$ .

Но, тем не менее, однозначный выбор можно обосновать. Достоверность рис. 2.3 очевидна. Поскольку по условию задачи элементарный конус вдавливается внутрь модельного тела, то напряжение  $\sigma_i$  следует ассоциировать с активными силами, а касательные  $\tau$  (2.27) и нормальные  $\sigma$  (2.28)

напряжения — с реактивными. Известно, что активные и реактивные силы направлены навстречу друг другу. А из работ [86, 87] следует, что вектор касательной компоненты полного напряжения вне зависимости от знака его модуля всегда ориентирован в сторону площадки действия большего из главных нормальных напряжений. В данном случае векторы  $\tau$  ориентированы в сторону площадки действия  $\sigma_i$ , значит, оно и есть большее, т.е.  $\sigma_3$ .

Далее рассмотрим дугу  $AB$  (рис. 2.2В), образованную пересечением свободного контура модельного тела с координатной плоскостью  $Oyz$  и, в частности, ближайшие окрестности произвольной точки  $O'$  на ней. Для удобства построений точка  $O'$  изображена в точности на оси  $Oz$ . В таком случае, ось  $O'z'$  локальной системы координат совпадает с  $Oz$  и ориентирована в другую сторону, т.е. внутрь модельного тела. Две другие оси  $O'x'$  и  $O'y'$  ориентированы равнонаклонно к плоскости  $Oyz$ , содержащей дугу  $AB$ . Такая ориентация локальной системы  $O'x'y'z'$  диктуется условиями текущего случая.

Как уже говорилось выше, свободный контур полностью состоит из главных площадок, на которых отсутствуют и касательные, и нормальные напряжения. Две другие главные площадки в выбранном случае ориентации равнонаклонны к плоскости  $Oyz$ , а действующие на них главные напряжения равны по модулю и знаку. Иначе может быть только, если предположить, что рассматриваемые главные площадки ориентированы по-другому.

Необходимо выяснить, какие эти главные напряжения: положительные (сжимающие), т.е. когда  $\sigma_1 = 0$ , а  $\sigma_2 = \sigma_3$  (рис. 2.2В1) или отрицательные (растягивающие), т.е. когда  $\sigma_3 = 0$ , а  $\sigma_1 = \sigma_2$  (рис. 2.2В2). Более вероятен последний вариант. Ведь с ростом интенсивности внешнего воздействия модельное тело все больше деформируется, а внешние поверхности все больше искривляются. Именно последнее обстоятельство указывает на то, что чем дальше на периферию, тем более вероятны растягивающие напряжения.

В отношении центральной точки  $O' = O$  (рис. 2.2С) модельного тела можно с уверенностью утверждать, что напряженное состояние среды в ближайших ее окрестностях качественно не отличается от уже рассмотренной центральной точки на пятне контакта (рис. 2.2А).

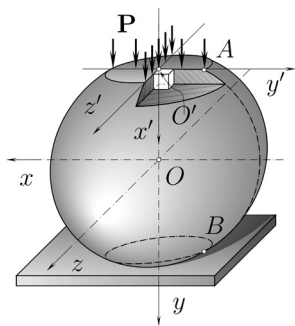
Рассмотрены все характерные точки на поверхности и в объеме модельного тела (рис. 2.2). Из анализа следует, что вне зависимости от справедливости наших рассуждений, для любой плоскости, проходящей через ось  $Oy$  вообще и для рассмотренной координатной плоскости  $Oyz$  в частности, ограничения плоского напряженного состояния (2.2), особенно в части ориентации векторов среднего главного нормального напряжения, не выполняются.

Следовательно, если все сказанное в текущем подразделе справедливо, то следует отказаться от применения двумерной модели. С выводами спешить не будем, поскольку хорошо проработанной трехмерной модели нет.

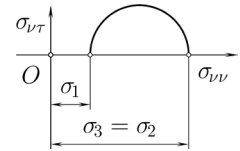
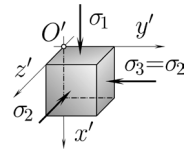
Продолжим анализ вариантов напряженного состояния сферического модельного тела на предмет такого, который удовлетворял бы ограничениям (2.2). Для этого рассмотрим группу рисунков 2.4.

2.4.2. Сферическое модельное тело. Двумерный случай. Из рис. 2.4А следует, что он практически полностью повторяет ситуацию рис. 2.2А. И в том, и другом случае в точке  $O'$  одна из главных площадок совпадает с поверхностью пятна контакта, а две другие перпендикулярны к ней. Ранее уже отмечалось, что главные нормальные напряжения, которые действуют в плоскости пятна контакта, не имеют определенной ориентации, а значит могут быть сориентированы, как на рис. 2.4А. Предполагается, что на плоскости  $Oxy$  выполняются требования плоской задачи (2.2). Физически достоверным является вариант, изображенный на рис. 2.4А2.

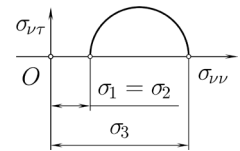
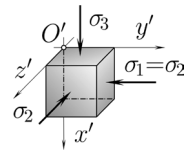
Далее рассмотрим крайнюю точку  $O' = A$  (рис. 2.4В) пятна контакта и содержащую ее координатную плоскость  $Oxy$ . Совершенно очевидно, что на внешней, совпадающей с пятном контакта грани элементарного кубика, имеются касательные напряжения. Нет их только на гранях, совпадающих с  $Oxy$ . Значит, эти грани и состоят из главных площадок, а оставшиеся таковыми не являются. Условиям плоской задачи (2.2) это не противоречит. Важно, чтобы именно среднее  $\sigma^2$  из трех главных нормальных напряжений соотносилось с площадками, совпадающими с  $Oxy$ .



1)



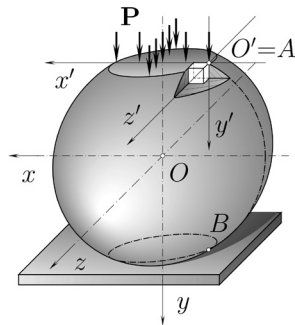
2)



A

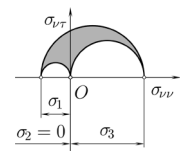
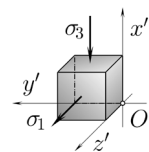
Главной является только площадка  $O'x'y'$ .

$$\sigma_{yy} = \sigma_{y'y'} \geq 0$$

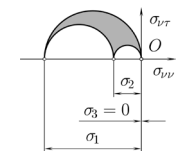
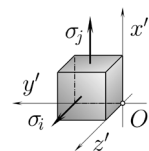


B

1)

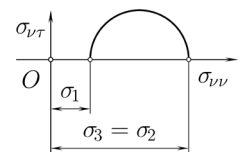
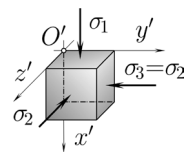


2)

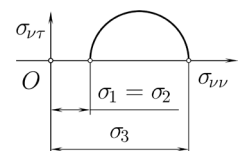
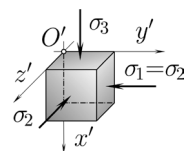


C

1)



2)



D

Рис. 2.4. Ориентация главных площадок и векторов главных напряжений в различных точках объема сферического модельного тела, находящегося в состоянии пластичности. Предполагается, что проходящая через центр тяжести модельного тела координатная плоскость  $Oxy$  полностью состоит из главных площадок. Принято, что  $i, j = 1, 2, 3; i \neq j$ .

Теперь рассмотрим дугу  $AB$  (рис. 2.4С). Она образуется пересечением координатной плоскости  $Oxy$  с внешними поверхностями деформированного модельного тела. При этом точки  $A$  и  $B$  принадлежат дуге  $AB$ , а предельный переход к ним ( $O' \rightarrow A$  или  $O' \rightarrow B$ ) осуществляется от центра дуги  $AB$ . Координатная плоскость  $O'x'y'$  локальной системы координат всегда совпадает с плоскостью  $Oxy$  основной системы, причем ось  $O'y'$  не обязательно проходит через точку  $O$ , а ось  $O'x'$  всегда касательная к поверхности внешнего контура.

При таком расположении осей системы  $O'x'y'$  и соответствующей ориентации граней элементарного кубика все они могут быть ассоциированы с главными площадками в точке  $O'$ . Сейчас можно однозначно утверждать, что одно из главных напряжений, которое действует на площадке свободного контура, всегда равно нулю, а второе, которое действует в горизонтальной плоскости, — всегда растягивающее. Последний тезис поясняется тем, что, в случае роста интенсивности внешнего воздействия, внешний контур модельного тела растягивается. Оставшееся главное нормальное напряжение, действующее вдоль  $O'x'$ , может быть либо положительным, либо отрицательным. Оба эти варианта изображены на выносных рисунках элементарных кубиков и на диаграммах Мора (рис. 2.4С1 и 2.4С2). Поскольку граница свободного контура в сечении  $Oxy$  (дуга  $AB$ ) с ростом интенсивности внешнего воздействия все больше сгибается, то наиболее вероятным является вариант с растягивающим напряжением (рис. 2.4С2). К тому же, если  $i = 2$ , а  $j = 1$ , то этот вариант удовлетворяет требованию плоской задачи (2.2).

Напряженное состояние в центральной точке  $O = O'$  (рис. 2.4D) модельного тела такое же, как и в уже рассмотренном случае по рис. 2.2С. Несколько иная ориентация граней элементарного кубика является законной и, к тому же, удовлетворяет требованиям плоской задачи (2.2).

2.4.3. Цилиндрическое модельное тело. Двумерный случай. Теперь можно думать, что рассмотрение упоминавшегося цилиндрического модельного тела не актуально. Ведь есть вполне логичный вариант (рис. 2.4)

напряженного состояния сферического модельного тела, который удовлетворяет условиям плоской задачи, а значит, может быть принят для дальнейшего рассмотрения. Забегая наперед, скажем, что реально сферическое модельное тело подчинено закономерностям напряженного состояния, которое иллюстрируется рис. 2.2, а просчитать мы его не можем из-за несовершенства трехмерных моделей. Второй случай (рис. 2.4) наоборот, мы можем и будем обсчитывать, но он не соответствует реальной ситуации, и поэтому дает необъяснимый результат. По указанное причине далее мы обратимся к анализу напряженного состояния горизонтального цилиндрического модельного тела бесконечной длины (рис. 2.5).

При кажущейся неадекватности обозначенного подхода, ничто не мешает двумя перпендикулярными к оси модельного тела плоскостями (параллельными координатной плоскости  $Oxy$ ) виртуально вырезать фрагмент такого тела, а затем сопоставить последний с таким же образом вырезанным фрагментом сферического тела. Во втором случае вырезание фрагмента осуществляется симметрично относительно центральной точки  $O$  модельного тела. Если далее использовать предельный переход, когда упомянутые секущие плоскости согласованно устремляются друг к другу до полного совпадения с  $Oxy$ , то различия между рассмотренными фрагментами исчезнут.

Проблема останется лишь с интегральным значением распределенной внешней нагрузки  $P$ . В первом случае эта нагрузка реально соотносится с круглым пятном контакта, а во втором с прямоугольным, размеры которого, чтобы добиться сопоставимости, придется обосновать.

Кроме условия (2.2), плоское напряженное состояние может формулироваться как такое, которое не зависит от одной из координат [87], например,  $z$  в текущем случае (рис. 2.5), когда вектор среднего главного нормального напряжения  $\sigma_2$  всегда ориентирован по нормали к плоскости  $Oxy$  и условия плоской задачи соблюдены.

Группа рисунков 2.5А иллюстрируют напряженное состояние среды в центральной точке  $O'$  на поверхности пятна контакта модельного тела. Боль-

шее из главных напряжений  $\sigma_3$  в этом случае ассоциируется с возмущающим воздействием, подобно случаю рис. 2.2A2 и 2.4A2. Только сейчас равенство  $\sigma_2 = \sigma_1$ , скорее всего, не достигается. Ведь в процессе вертикального деформирования цилиндра материалу некуда смещаться в направлении оси  $Oz$ , а в перпендикулярных направлениях есть куда. Именно это и обуславливает неравенство  $\sigma_2 \geq \sigma_1$ . Материал смещается вдоль поверхностей скольжения (в сечении с  $Oxy$  линией скольжения), для которых параллельные  $Oz$  прямые являются образующими. Таким образом, физически достоверным является только второй случай (рис. 2.5A2), когда большее из главных напряжений  $\sigma_3$  действует вертикально. Вариант по рис. 2.5A1 реализоваться не может.

Ситуацию в ближайших окрестностях точек, составляющих боковые поверхности модельного тела, в частности, в точках дуги  $AB$ , иллюстрирует группа рисунков 2.5B. Тут по своей физической сути напряженное состояние среды также похоже на уже рассмотренное ранее в отношении точек одноименной дуги сферического модельного тела на рис. 2.4C. Поскольку с ростом внешней нагрузки  $P$  дуга  $AB$  все больше выгибается в направлении от центра  $O$ , то наиболее вероятным является вариант с растягивающими напряжениями (рис. 2.5B2), но  $\sigma_2$  может быть равным нулю. Другой вариант напряженного состояния (рис. 2.5B1) является нереальным.

Напряженное состояние среды в точке  $O$  (рис. 2.5C) полностью повторяет ситуацию в точке  $O'$  пятна контакта (рис. 2.5A). Разница состоит только в том, что интенсивность действующих в  $O$  (рис. 2.5C) напряжений несколько ниже, чем тех, которые действуют в  $O'$  (рис. 2.5A). Физически достоверным для точки  $O$  также является последний вариант напряженного состояния (рис. 2.5C2). Первый вариант (рис. 2.5C1) является нереальным.

Общий вывод в отношении цилиндрического модельного тела таков. Его напряженное состояние подчинено условиям плоской постановки задачи (2.2), а, значит, предложенная выше модель пластичности может быть задействована для дальнейшего анализа и затем расчетов без ограничений.



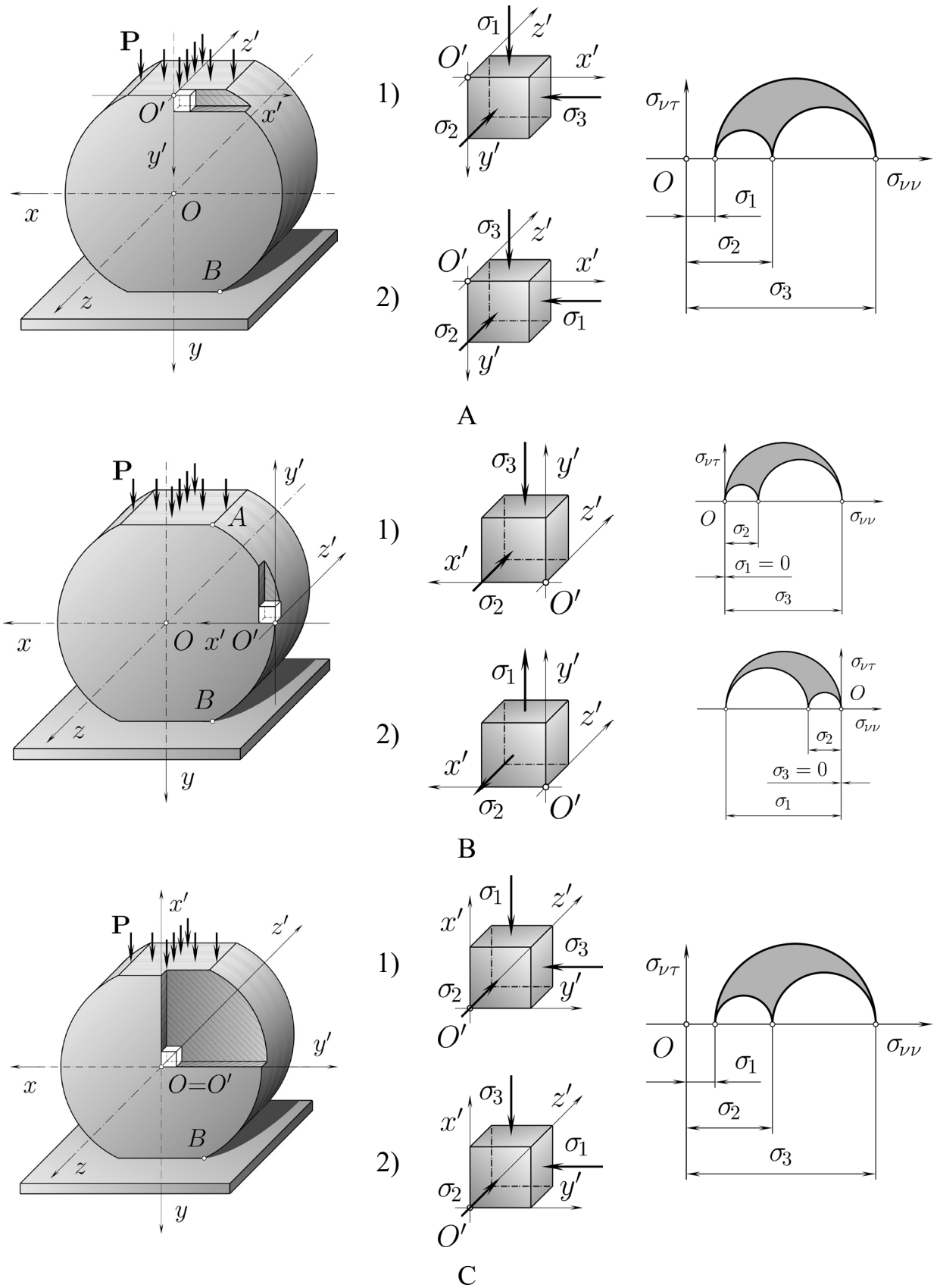


Рис. 2.5. Ориентация главных площадок и векторов главных напряжений в различных точках объема цилиндрического модельного тела, находящегося в состоянии пластичности.

2.4.4. Общие закономерности ориентации главных площадок и напряжений для сферического и цилиндрического модельных тел. Рассматриваются два варианта: 1) сферическое модельное тело — рис. 2.4А2, 4В, 4С2 и 4D2; 2) цилиндрическое модельное тело — рис. 2.5А2, 4В2, и 4С2. В поперечном сечении они представляются одинаково (рис. 2.6).

Из работ [80-85,87] известно, что в пределах верхнего пятна контакта  $L^u R^u$  (рис. 2.6) возможные значения угла  $\varphi$  находятся в интервал  $\varphi \in ]0, \pi[$ . Определяется  $\varphi$  соотношениями ((2.12)-(2.21)) и условиями трения (2.25).

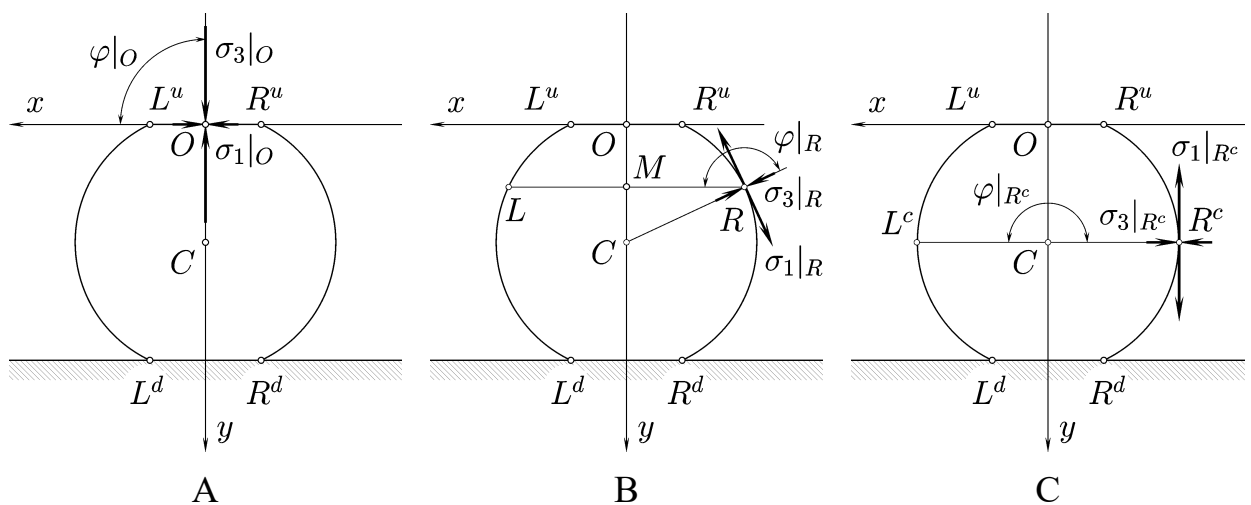


Рис. 2.6. Схема нагружения модельного тела.

Вдоль свободного контура (например, в точке  $R$  (рис. 2.6В)) величина угла  $\varphi = \varphi|_R$  определяется геометрией первого. Как уже говорилось, свободный контур полностью состоит из главных площадок, а нормальные напряжения  $\sigma_3$ , действующие на них, равны нулю, т.е.  $\sigma_3 = \sigma_3|_R = 0$ . Наименьшее главное нормальное напряжение  $\sigma_1$ , действующее в направлении касательной к свободному контуру, является растягивающим. Рис. 2.6 иллюстрирует наиболее общие закономерности изменения угла  $\varphi$  в зависимости от положения на пятне контакта или свободном контуре модельного тела. Предположительно, при переходе от точки  $L^c$  к  $R^c$  значения угла  $\varphi$  полностью пробегают интервал от  $0$  до  $\pi/2$ . Процесс изменения значений  $\varphi$  является моно-

тонным. Возможно, что в ближайших окрестностях точек  $L^u$ ,  $R^u$  и  $L^d$ ,  $R^d$  перехода от пятен контакта к свободным поверхностям, например, в пределах дуги  $R^u R^{u''}$  (рис. 2.1), изменение угла  $\varphi$  происходит существенно быстрее, чем на пятне контакта или свободном контуре.

Тут и далее, в соответствии с принятыми допущениями, нижнюю часть модельного тела (ниже горизонтальной оси симметрии Рис. 2.1) мы не рассматриваем, поскольку считаем, что напряженное состояние в ней является практически зеркальным отражением верхней части. Разумеется, реально, из-за весомости материала плода ( $\gamma \neq 0$ ), упомянутая картина напряженного состояния не является столь идеально симметричной.

## 2.5. Анализ закономерностей напряженного состояния в области пятна контакта плода с деформатором, а также в его произвольном горизонтальном сечении

Закономерности связи  $s|_{y=const} = s(\varphi)$  (2.13), выполняющиеся вдоль поверхности  $L^u R^u$  пятна контакта [80-85,87], изучим, обратившись к рис. 2.7. Поскольку нас интересует качественная сторона вопроса, то на рисунке все величины приняты безразмерными, а значения отвлеченными от истинных.

Возвратимся к анализу интервала изменения угла  $\varphi \in [\varphi|_{L_i^u}, \varphi|_{R_i^u}]$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) в пределах верхнего пятна контакта  $L^u R^u$  с учетом условий трения (2.25) на нем. Из рисунка видно, что величину постоянной интегрирования  $C_y^+$  определяет интенсивность внешней нагрузки  $P$ . Ведь в данном случае  $P$  тем больше, чем больше  $s$  и наоборот. При любых нагрузках (до разрушения плода) ширину интервала  $\varphi \in [\varphi|_{L_i^u}, \varphi|_{R_i^u}]$  определяет условие трения (2.25).

Закономерности связи  $s|_{y=const} = s(\varphi)$  (2.13) остаются такими же и для любого горизонтального сечения  $LR$  (рис. 2.6В) плода томата. Исключение составляет только интервал возможных значений угла  $\varphi$ . Он будет другим, и определяться будет по другому, т.е. без учета условий трения (2.25).

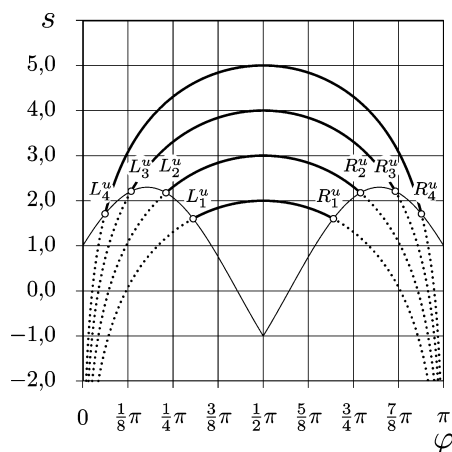


Рис. 2.7. Граничные зависимости полусуммы главных нормальных напряжений  $s$  от величины угла  $\varphi$ , отвечающие: а) соотношению на абсциссе (2.13) при различных уровнях интенсивности внешней нагрузки, которым соответствует  $C_y^+ = 2, 3, 4$  и  $5$  (участки  $L_1^u R_1^u, L_2^u R_2^u, L_3^u R_3^u, L_4^u R_4^u$  кривых .....—); б) условию трения (2.25), действующему в области пятна контакта  $L^u R^u$  при  $f = 0,45$  ( ). Пластическая постоянная  $k = 1$ .

Заметим, что текущая задача принципиально отличается от рассмотренной в работах [80,83-85,87] задачи уплотнения идеально-вязкой среды в узком вертикальном зазоре.

Первое отличие состоит в том, что в данном случае боковые стенки объекта воздействия (плода томата) остаются свободными, а, значит, ситуация на обеих частях свободного контура всегда одинакова и, следовательно, текущая задача является в полном смысле осесимметричной (по отношению к  $Oy$ ), на основании чего можно заключить, что для произвольного горизонтального сечения  $LR$  плода томата справедливо равенство

$$\frac{1}{2}\pi - \varphi^l = \varphi^r - \frac{1}{2}\pi = \Delta_{\varphi^{lr}}, \quad (2.33)$$

где  $\Delta_{\varphi^{lr}}$  — полуинтервал изменения угла  $\varphi$ , а  $\varphi^l$  и  $\varphi^r$  — значения углов  $\varphi = \varphi|_L$  и  $\varphi = \varphi|_R$  в крайних точках  $L$  и  $R$  с координатами  $(x^l, y^l)$  и  $(x^r, y^r)$  произвольного сечения  $LR$ . В частном случае, когда сечение  $LR$  совпадает с пятном контакта  $L^u R^u$ , выражение (2.33) преобразуется к виду:

$$\Delta_{\varphi^u} = \frac{1}{2}\pi - \varphi^{lu} = \varphi^{ru} - \frac{1}{2}\pi, \quad (2.34)$$

где  $\Delta_{\varphi^u}$  — полуинтервал изменения угла  $\varphi$ , а  $\varphi^{lu}$ , и  $\varphi^{ru}$  — значения углов  $\varphi = \varphi|_{L^u}$ ,  $\varphi = \varphi|_{R^u}$  в крайних точках  $L^u$  и  $R^u$  с координатами  $(x^{lu}, y^{lu})$ ,  $(x^{ru}, y^{ru})$  пятна контакта  $L^u R^u$ .

На основании вывода об осевой симметричности плода в деформированном состоянии можно определить ординату  $y^{lr}$  произвольного сечения  $LR$

$$y^{lr} = y^l = y^r \quad (2.35)$$

и единственную ординату  $y^u$  пятна контакта

$$y^u = y^{lu} = y^{ru}, \quad (2.36)$$

которая в нашем частном случае равна нулю

$$y^u = 0. \quad (2.37)$$

*Второе отличие* текущей задачи состоит в том, что значения углов  $\varphi^{lu}$  и  $\varphi^{ru}$  определяются иными граничными условиями, чем те, которые рассматриваются в работах [80,83-85,87].

*Третье отличие* касается геометрии области нагружения. В работах [80,83-85,87] — это прямоугольный объем бесконечной высоты и длины.

В дальнейшем мы используем результаты работ [80-85, 87], но все три сформулированные выше отличия обязательно будем учитывать.

## 2.6. Вывод выражений интегралов полного напряжения,

действующего в пределах произвольного горизонтального сечения  
плода томата как изначально сферического тела

Рассматривается вариант плоского напряженного состояния изначально сферического модельного тела в соответствии с рис. 2.4 (A2, B, C2 и D2).

2.6.1. Интеграл внешней нагрузки. Запишем выражение интеграла  $I_u$  внешней нагрузки  $P$  (в соответствии с формулой для вычисления объема тела вращения [90]):

$$I_u = -2\pi \int_{R^u}^O \sigma_{yy} x dx = 2\pi \int_O^{L^u} \sigma_{yy} x dx, \quad (2.38)$$

где направление интегрирования «справа — налево» определяется соответствующим положительным направлением оси абсцисс на рис. 2.6, а абсцисса  $x$  и вертикальная компонента  $\sigma_{yy}$  подчинены соотношениям (2.12) и (2.22).

Выполним подстановку соотношений (2.12) и (2.22) в (2.38)

$$I_u = 2\pi \int_{R^u}^O \{k[\ln(\sin^2 \varphi) - \cos 2\varphi] + C_y^+\} (C^u \operatorname{ctg} \varphi + C_y^*) \frac{-C^u}{\sin^2 \varphi} d\varphi, \quad (2.39)$$

где

$$C^u = 2k \exp \frac{\gamma y^u - \tilde{C}_y}{2k}, \quad (2.40)$$

— для данного  $y = y^u$  постоянная величина.

Чтобы интегрировать (2.39), прибегнем к ряду замен и преобразований ((A.1)-(A.9)). В конечном итоге получаем выражение интеграла  $I_u$  внешней нагрузки, как функции полуинтервала  $\Delta_{\varphi^u}$  изменения угла  $\varphi \in [\varphi^{lu}, \varphi^{ru}]$

$$I_u(\Delta_{\varphi^u}) = \frac{\pi k (C^u)^2}{\cos^2 \Delta_{\varphi^u}} \left[ \left( \frac{C_y^*}{C^u} \sin 2\Delta_{\varphi^u} - \cos 2\Delta_{\varphi^u} \right) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^u}) + \right. \\ \left. + \frac{C_y^*}{C^u} \left( 1 + \frac{C_y^+}{k} \right) \sin 2\Delta_{\varphi^u} + \frac{C_y^+}{k} \sin^2 \Delta_{\varphi^u} \right], \quad (2.41)$$

где постоянная  $C^u$  определяется выражением (2.40), а остальные постоянные  $C_y^+$ ,  $C_y^*$  и  $\tilde{C}_y$  (входят в (2.40)) соответствуют соотношениям на абсциссе ((2.13) -(2.15)) и конкретному значению ординаты  $y = y^u$ .

2.6.2 Интеграл полного напряжения, действующего во внутреннем горизонтальном сечении тела томата. Обозначим  $I$  — интеграл полного напряжения, действующего в произвольном горизонтальном сечении  $LR$ . Очевидно, что интеграл касательной компоненты полного напряжения в  $LR$  всегда равен нулю, а, значит, чтобы получить  $I$ , можно повторить выкладки ((2.38) -(2.40)-(A.1)-(A.9) - (2.41)) изменив только пределы интегрирования, которыми теперь являются крайние точки  $L$  и  $R$  сечения  $LR$ . В таком случае

$$I = -2\pi \int_R^M \sigma_{yy} x dx = 2\pi \int_M^L \sigma_{yy} x dx \quad (2.42)$$

и мы, ориентируясь на (2.41), заменив верхние индексы « $u$ » на « $lr$ », сразу записываем конечное выражение интеграла

$$I(\Delta_{\phi^{lr}}) = \frac{\pi k (C^{lr})^2}{\cos^2 \Delta_{\phi^{lr}}} \left[ \left( \frac{C_y^*}{C^{lr}} \sin 2\Delta_{\phi^{lr}} - \cos 2\Delta_{\phi^{lr}} \right) \ln(\cos^2 \Delta_{\phi^{lr}}) + \frac{C_y^*}{C^{lr}} \left( 1 + \frac{C_y^+}{k} \right) \sin 2\Delta_{\phi^{lr}} + \frac{C_y^+}{k} \sin^2 \Delta_{\phi^{lr}} \right], \quad (2.43)$$

где

$$C^{lr} = 2k \exp \frac{\gamma y^{lr} - \tilde{C}_y}{2k}, \quad (2.44)$$

а остальные постоянные  $C_y^+$ ,  $C_y^*$  и  $\tilde{C}_y$  соответствуют тем же соотношениям на абсциссе ((2.13) - (2.15)) но другому значению  $y = y^{lr} \neq y^u$ , а, значит, по величине с одноименными постоянными для  $I_u(\Delta_{\phi^u})$  (2.41) не совпадают.

Поскольку материал, составляющий, плод томата мы считаем весомым (его плотность определяется параметром  $\gamma$ ), то связь между интегралами  $I_u(\Delta_{\phi^u})$  (2.41) и  $I(\Delta_{\phi^{lr}})$  (2.43) можно выразить следующим образом

$$I = I_u + \gamma \Delta_V, \quad (2.45)$$

где  $\Delta_V$  — объем верхнего фрагмента плода  $L^u R^u RL$ , т.е. расположенного между верхним пятном контакта  $L^u R^u$  и секущей плоскостью  $LR$ . Этот фрагмент представляет собой тело вращения, осью которого является  $Oy$ , а образующей отрезки дуги  $L^u L$  или  $R^u R$ . На основании этого записываем:

$$\Delta_V = \pi \int_{L^u}^L x^2 dy = \pi \int_{R^u}^R x^2 dy = \pi \int_{y^u}^{y^{lr}} x^2 dy, \quad (2.46)$$

где  $x$  понимается как функция независимой координаты  $y$ , т.е.  $x = x(y)$  — уравнение кривой свободного контура на участке  $L^u L$  или  $R^u R$ .

2.6.3. Анализ полученных выражений для интегралов внешней нагрузки и полного напряжения в произвольном горизонтальном сечении. Последовательно выразим все постоянные  $C^u$ ,  $C_y^+$ ,  $C_y^*$  и  $\tilde{C}_y$ , что входят в интегралы  $I_u(\Delta_{\phi^u})$  (2.41) и  $I(\Delta_{\phi^{lr}})$  (2.43), через  $\Delta_{\phi^u}$  и  $\Delta_{\phi^{lr}}$  соответ-

ственно. Для этого повторим выкладки работы [87].

Поскольку нам известно, что

$$\varphi|_O = \varphi|_M = \varphi|_C = \frac{1}{2}\pi, \quad (2.47)$$

а также учитывая, что абсцисса всех перечисленных точек  $O$ ,  $M$  и  $C$  равна нулю, и, воспользовавшись соотношением (2.12), записываем

$$C_y^*|_{L^u R^u} = C_y^*|_{LR} = 0. \quad (2.48)$$

Постоянную  $\tilde{C}_y$  также определим из соотношения (2.12). Сначала для пятна контакта  $L^u R^u$

$$\begin{pmatrix} x^{lu} \\ x^{ru} \end{pmatrix} = 2k \exp\left(\frac{\gamma y^u - \tilde{C}_y}{2k}\right) \operatorname{ctg}\begin{pmatrix} \varphi^{lu} \\ \varphi^{ru} \end{pmatrix}, \quad (2.49)$$

откуда

$$\tilde{C}_y|_{L^u R^u} = \gamma y^u + 2k \ln\left[\frac{2k(\operatorname{ctg}\varphi^{lu} - \operatorname{ctg}\varphi^{ru})}{x^{lu} - x^{ru}}\right]. \quad (2.50)$$

Используя определение (2.34) полуинтервала  $\Delta_{\varphi^u}$ , а также положить, что

$$\Delta_{\varphi^u} \in ]0, \frac{1}{2}\pi[, \quad (2.51)$$

а

$$d = x^{lu} - x^{ru}, \quad (2.52)$$

то из (2.50) окончательно получаем

$$\tilde{C}_y(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u} = \gamma y^u + 2k \ln \frac{4k \operatorname{tg} \Delta_{\varphi^u}}{d}. \quad (2.53)$$

Аналогично повторив выкладки ((2.49) – (2.53)), получаем выражение постоянной  $\tilde{C}_y$  для сечения  $LR$

$$\tilde{C}_y(\Delta_{\varphi^{lr}})|_{LR} = \gamma y^{lr} + 2k \ln \frac{4k \operatorname{tg} \Delta_{\varphi^{lr}}}{x^l - x^r}, \quad (2.54)$$

где подразумевается, что ордината  $y^{lr}$  — назначаемая величина, а разность абсцисс ( $x^l - x^r$ ) — не определена.

Поскольку постоянные  $\tilde{C}_y(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u}$  (2.53) и  $\tilde{C}_y(\Delta_{\varphi^{lr}})|_{LR}$  (2.54) уже определены, то, выполнив подстановку их в выражения (2.40) и (2.44), получаем

$$C^u(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u} = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \Delta_{\varphi^u}} \quad (2.55)$$

и



$$C^{lr}(\Delta_{\varphi^{lr}})|_{LR} = \frac{x^l - x^r}{2 \operatorname{tg} \Delta_{\varphi^{lr}}}. \quad (2.56)$$

Далее, имея ввиду выражение  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  (2.41), выразим вошедшую в него постоянную  $C_y^+$  через  $\Delta_{\varphi^u}$ . Для этого, используя условие на границе (2.25) и соотношение (2.13), а также положив, что

$$\varphi = \varphi^{lu}, \text{ когда } \varphi \in ]0, \frac{1}{2}\pi], \text{ или } \varphi = \varphi^{ru}, \text{ когда } \varphi \in ]\frac{1}{2}\pi, \pi[ \quad (2.57)$$

Применив (2.34), получим выражение

$$C_y^+(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u} \geq k \left( \frac{|\sin(\pi \mp 2\Delta_{\varphi^u})|}{f} + \cos(\pi \mp 2\Delta_{\varphi^u}) \right) - k \ln \left[ \sin^2 \left( \frac{1}{2} \pi \mp \Delta_{\varphi^u} \right) \right], \quad (2.58)$$

где верхние знаки соответствуют интервалу значений  $\varphi \in ]0, \frac{1}{2}\pi]$  (2.57), а нижние интервалу  $\varphi \in ]\frac{1}{2}\pi, \pi[$  (2.57). Проведя тригонометрические преобразования выражения (2.58) и учитывая (2.51), из которого следует, что  $\sin(2\Delta_{\varphi^u}) > 0$ , получаем для  $C_y^+(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u}$  более компактную форму:

$$C_y^+(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u} \geq k \left[ \frac{\sin(2\Delta_{\varphi^u})}{f} - \cos(2\Delta_{\varphi^u}) - \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^u}) \right]. \quad (2.59)$$

Теперь выполним подстановку полученных выражений  $C_y^*(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u}$  (2.48) и  $C^u(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u}$  (2.53), а также  $C_y^+(\Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u}$ , подразумевая, что (2.59) равно, в выражение интеграла  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  (2.41). В итоге получаем

$$I_u(\Delta_{\varphi^u}) = \frac{\pi k d^2}{4} \left[ \frac{\sin(2\Delta_{\varphi^u})}{f} - \cos(2\Delta_{\varphi^u}) - \operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^u} \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^u}) \right]. \quad (2.60)$$

Подобным образом поступим и с выражением  $I(\Delta_{\varphi^{lr}})$  (2.43). Но, поскольку аналитическое представление связи  $C_y^+(\Delta_{\varphi^{lr}})|_{LR}$  для него неизвестно (граничных условий (2.26) для этого недостаточно), то  $C_y^+$  оставим как есть, а вместо  $C_y^*(\Delta_{\varphi^{lr}})|_{LR}$  и  $C^{lr}(\Delta_{\varphi^{lr}})|_{LR}$  подставим соответствующие выражения (2.48) и (2.56). В результате записываем:

$$I(\Delta_{\varphi^{lr}}) = \frac{\pi(x^l - x^r)^2}{4} [C_y^+ + k(1 - \text{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) (\ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}))]. \quad (2.61)$$

Проанализируем полученное выражение (2.60). В него входят два параметра  $f$  и  $k$ , характеризующие физико-механические свойства естественного материала, составляющего плод. Кроме того, в него входит диаметр  $d$  пятна контакта и полуинтервал  $\Delta_{\varphi^u}$  изменения угла  $\varphi$ . Величины  $f$ ,  $k$ ,  $d$  и само значение интегральной нагрузки  $I_u$  могут быть определены экспериментально, а значение полуинтервала  $\Delta_{\varphi^u}$  — вычислено из (2.60).

В отношении выражения (2.61) интеграла полного напряжения  $I(\Delta_{\varphi^{lr}})$ , можно сказать следующее. Непосредственным образом в него входит коэффициент пластичности  $k$ , измеренный по расположенному на высоте  $y^{lr}$  горизонтальному сечению диаметр плода томата  $(x^l - x^r)$ , полуинтервал  $\Delta_{\varphi^{lr}}$  изменения угла  $\varphi$  и постоянная  $C_y^+$ . Все перечисленные величины, включая значение  $I$  (учитывая (2.45)), и, наоборот, исключая  $C_y^+$ , могут быть определены экспериментально. Из этого следует, что получить постоянную  $C_y^+$  можно, вычислив ее значение из выражения (2.61) по формуле

$$C_y^+ = \frac{4I}{\pi(x^l - x^r)^2} - k(1 - \text{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}). \quad (2.62)$$

Если же говорить о вычислении  $I$  путем применения выражения (2.45), то следует иметь в виду, что в таком случае понадобится известность величин плотности  $\gamma$  (табл. 4.5), интегрального значения внешней нагрузки  $I_u$ , а также объема  $\Delta_V$  (2.46) верхней (по отношению к сечению  $LR$ ) части томата. К тому же, выражение (2.46), в свою очередь, предполагает известность геометрии свободного контура плода томата, как минимум, на участке между пятном контакта  $L''R''$  и текущим сечением  $LR$ .

Далее, возвращаясь к выражению (2.60) для вычисления интеграла внешней нагрузки  $I_u$  и обратившись к рис. 2.8 изучим функциональные свя-

зи  $I_u(f, \Delta_{\varphi^u})$ ,  $I_u(k, \Delta_{\varphi^u})$  и  $C_y^+(f, \Delta_{\varphi^u})|_{L^u R^u}$ , где, с целью повышения иллюстративности, цифровые значения взяты несколько отвлеченными от реальных.

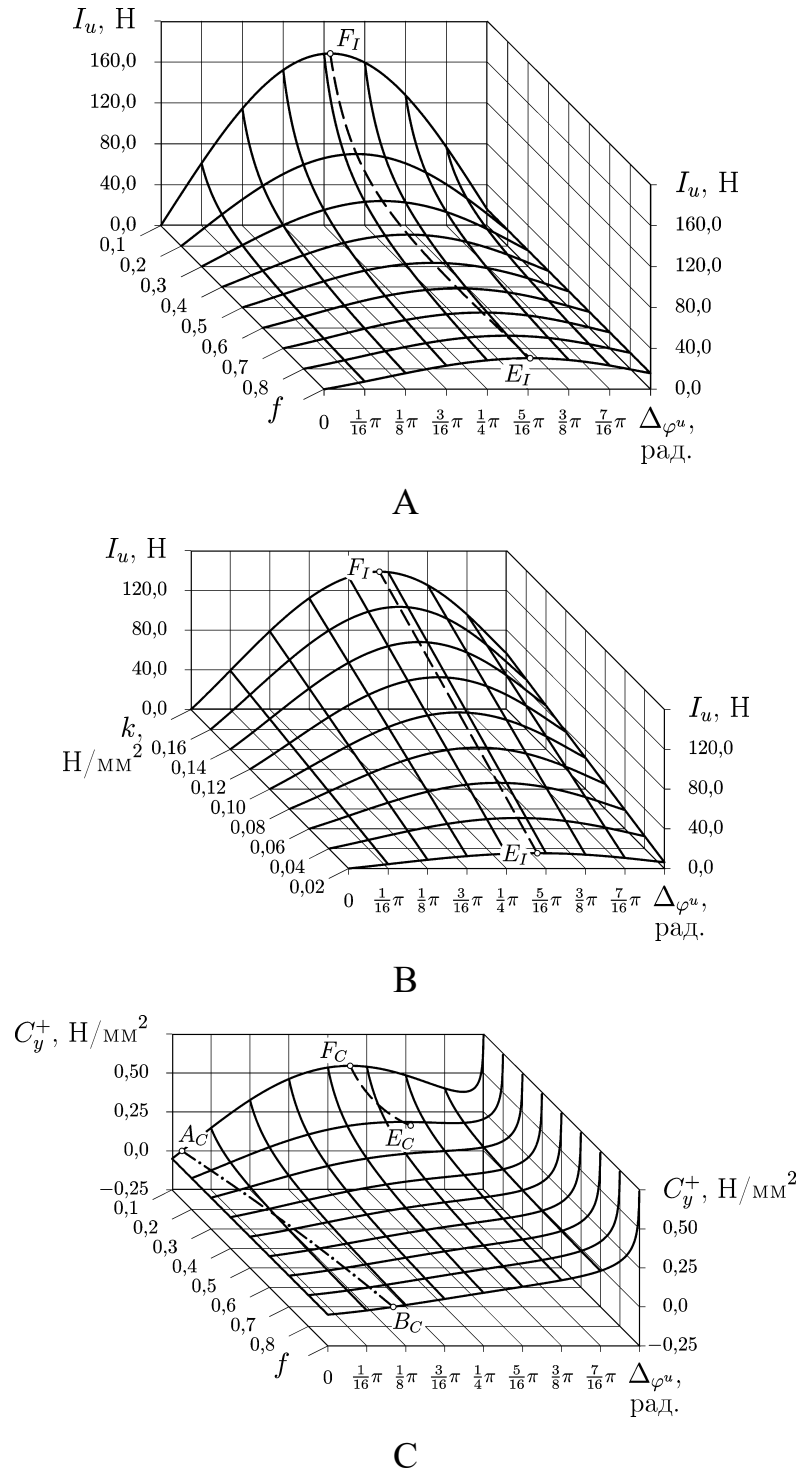


Рис. 2.8. — Функциональные зависимости: А) —  $I_u = I_u(f, \Delta_{\varphi^u})$ , если в (2.60) принято, что  $k = 0,05$  Н/мм<sup>2</sup> и  $d = 20$  мм; В) —  $I_u = I_u(k, \Delta_{\varphi^u})$ , если в (2.60) принято, что  $f = 0,6$  и  $d = 20$  мм; С) —  $C_y^+ = C_y^+(f, \Delta_{\varphi^u})$  если в (2.59) принято, что  $k = 0,05$  Н/мм<sup>2</sup>

Из рис. 2.8А видно, что для любого  $f = \text{const}$  значение интеграла  $I_u = I_u(f, \Delta_{\varphi^u})$  имеет экстремум (линия  $F_1E_1$ ). Это обстоятельство можно трактовать так. В начале рост интегрального значения  $I_u$  внешней нагрузки сопровождается ростом величины  $\Delta_{\varphi^u}$ , в то время как все другие переменные и параметры, в частности постоянная  $C_y^+$ , остаются неизменными. Далее, по достижению критического значения  $\Delta_{\varphi^u} = \Delta_{\varphi^u} |_{F_1E_1}$ , такое развитие событий невозможно. Ведь если  $\Delta_{\varphi^u}$  будет продолжать увеличиваться, когда все другие упоминавшиеся выше величины будут оставаться фиксированными, то это повлечет уменьшение  $I_u$  и косвенно будет означать, что превысить  $I_u = I_u |_{F_1E_1}$  нельзя. Разумеется, последнее не соответствует реальности.

Для разрешения этой коллизии обратимся к рис. 2.7. Из него видно, что рост интенсивности внешнего воздействия  $I_u$  (рост значения  $s$ ) может происходить в соответствии с двумя вариантами течения событий: *первый (однозначный)* — на каком-то этапе (вероятно при достижении упоминавшегося экстремума  $I_u(f, \Delta_{\varphi^u})$ ) рост значений  $\varphi^{lu}$ ,  $\varphi^{ru}$ , или, что то же самое,  $\Delta_{\varphi^u}$  прекращается, и дальнейшее увеличение  $I_u$  достигается за счет повышения значения постоянной интегрирования  $C_y^+$ ; *второй (компромиссный)* — опять-таки на том же этапе рост значений  $\Delta_{\varphi^u}$  не прекращается, а вероятно замедляется, и дальнейшее увеличение  $I_u$  достигается за счет более интенсивного (опережающего) увеличения  $C_y^+$ .

Оба варианта развития событий не противоречат граничному условию (2.25), что в физическом смысле является корректным.

Из приведенного выше также следует, что выражение (2.60) можно применять только до тех пор, пока  $\Delta_{\varphi^u} \leq \Delta_{\varphi^u} |_{F_1E_1}$ .

Рис. 2.8В показывает, что критическое значение  $\Delta_{\varphi^u} = \Delta_{\varphi^u} |_{F_1E_1}$  не зависит от величины пластической постоянной  $k$  и полностью определяется коэффициентом трения  $f$ , действующего в области пятна контакта  $L^u R^u$ .

Из рис. 2.8С видно, что поверхность  $C_y^+(f, \Delta_{\varphi^u})$  (2.59) при определенных значениях  $f \leq f|_{E_C}$  внутри интервала  $\Delta_{\varphi^u} \in ]0, \frac{1}{2}\pi[$  (2.51) также может иметь локальный экстремум (линия  $F_C E_C$ ). Важно заметить, что для одних и тех же  $f \leq f|_{E_C} = \text{const}$  выполняется неравенство  $\Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I} < \Delta_{\varphi^u}|_{F_C E_C}$ . Таким образом, анализируя правомерность применения выражения  $I_u = I_u(\Delta_{\varphi^u})$  (2.60), можно не прибегать к анализу выражения  $C_y^+ = C_y^+(\Delta_{\varphi^u})$  (2.59).

Чтобы получить выражение интеграла  $I_u$ , для значений  $I_u > I_u|_{F_I E_I}$  и первого варианта развития напряженного состояния, необходимо снова обратиться к выражению (2.41), в котором фиксировать значения  $\Delta_{\varphi^u} = \Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I}$ , а постоянную  $C_y^+$  рассматривать как независимую переменную, которая в обязательном порядке превышает значение, вычисленное по (2.59), когда  $\Delta_{\varphi^u} = \Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I}$ . Учитывая приведенное, используя (2.55), записываем

$$I_u(C_y^+) = \frac{\pi d^2}{4} [C_y^+ + k(1 - \text{ctg}^2 \Delta_{\varphi^u}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^u})] \quad (2.63)$$

где  $\Delta_{\varphi^u} = \Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I} = \text{const}$ .

Если в (2.63) положить, что  $\Delta_{\varphi^u} > \Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I}$ , то тогда это выражение будет удовлетворять и второму варианту развития напряженного состояния.

Таким образом, при моделировании внешнего силового воздействия, в частности при подборе параметров  $\Delta_{\varphi^u}$  и  $C_y^+$ , которые должны обеспечивать заданную величину интегрального значения  $I_u$  внешней силовой нагрузки, при малых  $I_u \leq I_u|_{F_I E_I}$  и соответственно при  $\Delta_{\varphi^u} \leq \Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I}$  следует применять выражение (2.60), а при больших  $I_u > I_u|_{F_I E_I}$  — выражение (2.63).

Непосредственно из анализа выражения (2.60) следует, что положение максимума  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  не зависит ни от величины пластической постоянной  $k$ , ни от величины пятна контакта  $L^u R^u$  (диаметра  $d$ ), а полностью определяется величиной коэффициента внешнего трения  $f$  (рис. 2.9).

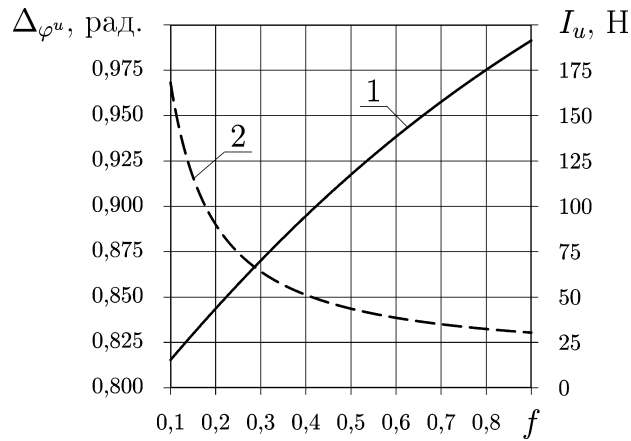


Рис. 2.9. Зависимость величины  $\Delta_{\varphi^u}$  (кривая 1), при котором значение интегральной нагрузки  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  достигает своего экстремального значения (кривая 2) от величины коэффициента  $f$  внешнего трения, когда диаметр  $d$  пятна контакта  $L^u R^u$  принят равным 20 мм

Далее, предполагая случай, когда все параметрические величины  $\gamma$ ,  $y^{lr}$ ,  $k$ , а также постоянные  $C^u$ ,  $C_y^+$ ,  $C_y^*$  и  $\tilde{C}_y$  известны и, к тому же  $C_y^* = 0$  (2.48), упростим выражение (2.43). В результате получаем

$$I(\Delta_{\varphi^{lr}}) = K \operatorname{tg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}} [C_y^+ + k(1 - \operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})], \quad (2.64)$$

где

$$K = 4\pi k^2 \exp \frac{\gamma y^{lr} - \tilde{C}_y}{k}. \quad (2.65)$$

Выражение (2.64) может быть использовано применительно к произвольному горизонтальному сечению плода томата для подбора такого значения  $\Delta_{\varphi^{lr}}$ , которое, будучи подставленным в (2.64), при заданных значениях  $I_u$ ,  $\gamma$ ,  $\Delta_{\varphi^u}$  тождественно удовлетворило бы уравнению (2.45).

Исследуем выражение (2.64). Понятно, что применительно к текущей задаче справедливо требование  $I_u(\Delta_{\varphi^u}) > 0$ . Кроме того, поскольку  $K \operatorname{tg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}} > 0$ , из анализа (2.64) вытекает, что знак  $I(\Delta_{\varphi^{lr}})$  определяет выражение в прямоугольных скобках правой части и при любых физически осмысленных значениях  $\Delta_{\varphi^{lr}} \in ]0, \frac{1}{2}\pi[$  должно выполняться условие

$$C_y^+ + k(1 - \operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) > 0. \quad (2.66)$$

Из последнего получаем

$$\frac{C_y^+}{k} > (\operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}} - 1) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}). \quad (2.67)$$

В случае равенства, выражение (2.67) иллюстрирует рис. 2.10. Таким образом, если мы в дальнейшем продолжим анализ влияния величин  $C_y^+$  (рис. 2.11) и  $k$  (рис. 2.12) на закономерности связи  $I(\Delta_{\varphi^{lr}})$  (2.64) и при этом обнаружится, что условие  $I_u(\Delta_{\varphi^u}) > 0$  не выполняется, то это будет означать, что отношение  $C_y^+ / k$  (2.67) вышло за свой допустимый минимум, а сама ситуация не является физически осмысленной.

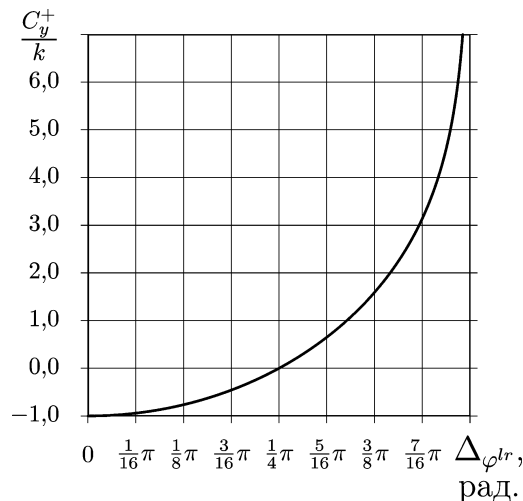
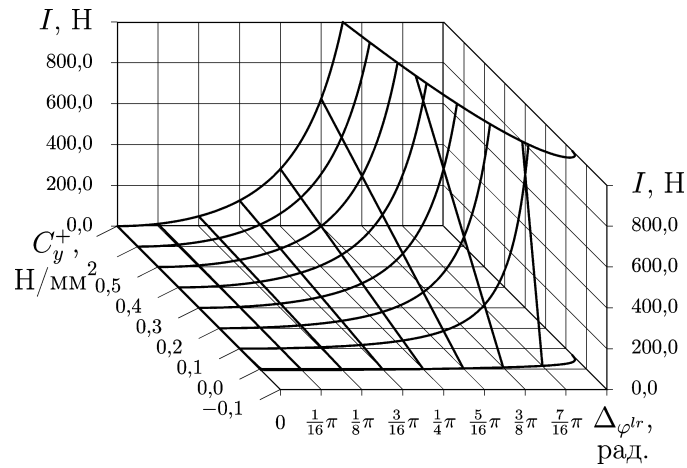
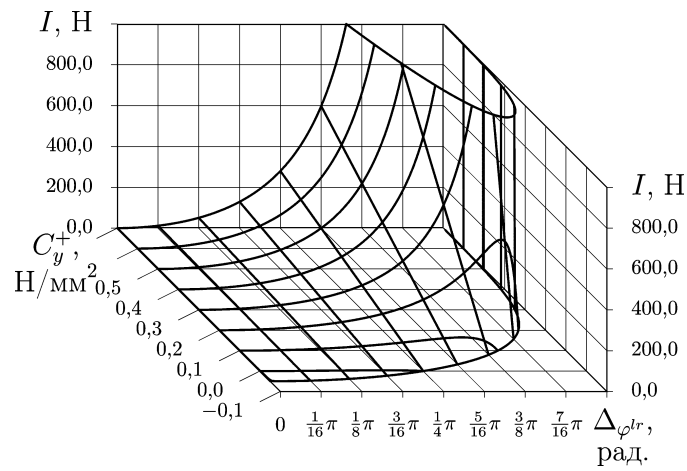


Рис. 2.10. График нижнего предела отношения  $C_y^+ / k$  (2.67), рассматриваемого как функция  $\Delta_{\varphi^{lr}}$

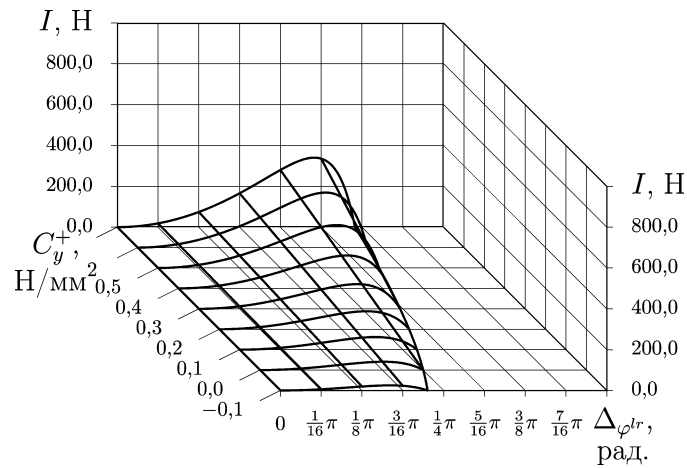
Рис. 2.13 отражает взаимосвязи величины множителя  $K$  (2.65) с определяющими его параметрами  $k$  и  $\tilde{C}_y$ . В конечном итоге рис. 2.13 позволяет более полно оценить функциональную связь  $I = I(\Delta_{\varphi^{lr}})$  с учетом постоянных величин. Из рис. 2.12 и выражения (2.65) вытекает, что в области малых значений  $k$  и  $\tilde{C}_y$  значение интеграла  $I$  (2.64), по сравнению с рис. 2.12, может существенно вырасти. Но, тем не менее, на ширину области неположительных значений  $I$  (2.64) величина  $k$  и  $\tilde{C}_y$  влияния не оказывает.



А



В



С

Рис. 2.11. Функциональные зависимости  $I = I(C_y^+, \Delta\varphi^{lr})$  (2.64), рассчитанные при  $\gamma = 0,000008 \text{ Н/мм}^3$ ,  $y^{lr} = 10,0 \text{ мм}$  и  $K = 400,0 \text{ мм}^2$ , когда: А)  $k = 0,005 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\tilde{C}_y = -0,0702 \text{ Н/мм}^2$ ; В)  $k = 0,05 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\tilde{C}_y = -0,4725 \text{ Н/мм}^2$ ; С)  $k = 0,5 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\tilde{C}_y = -2,4233 \text{ Н/мм}^2$



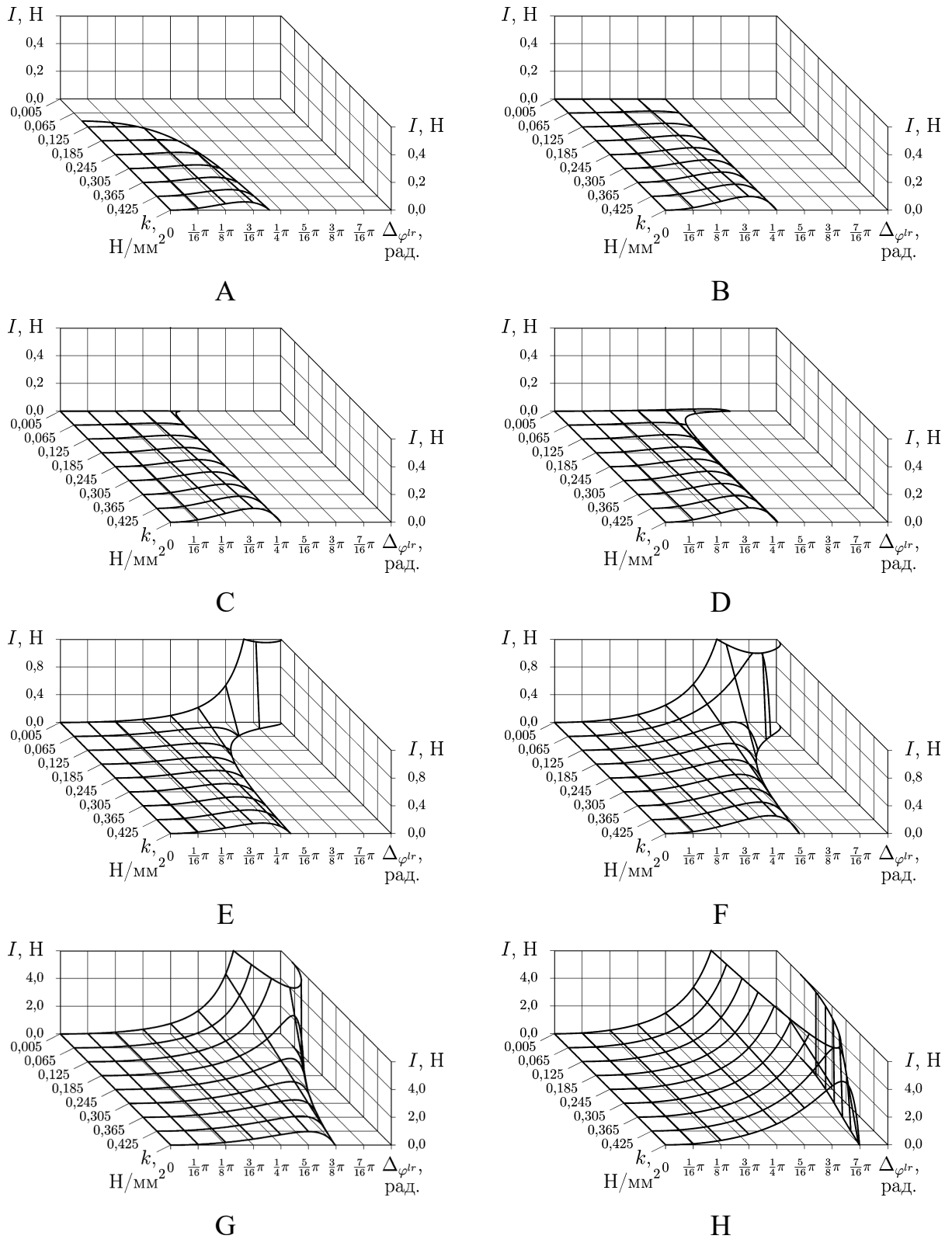


Рис. 2.12. Функциональные зависимости  $I = I(k, \Delta\varphi^{lr})$  (2.64), рассчитанные

для случая, когда  $\gamma = 0,000008 \text{ Н/мм}^3$ ,  $y^{lr} = 10,0 \text{ мм}$  и  $K = 1,0 \text{ мм}^2$  и различных значений  $C_y^+$  (в  $\text{Н/мм}^2$ ): А) — 0,1; В) — 0,0; С) — 0,001;

Д) — 0,01; Е) — 0,1; F) — 0,25; G) — 0,75; H) — 1,50.

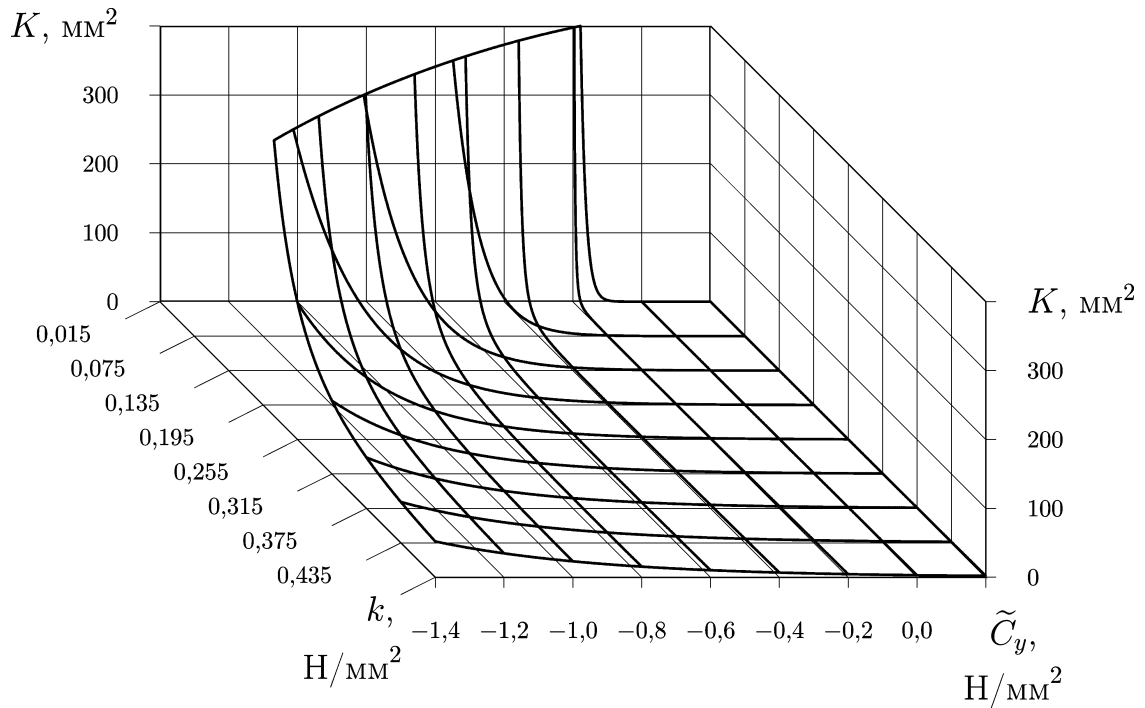


Рис. 2.13. Поверхность, иллюстрирующая связь величины множителя  $K$  (2.65) с определяющими его значениями сцепления  $k$  и постоянной интегрирования  $\tilde{C}_y$ , если:  $\gamma = 0,000008 \text{ Н/мм}^3$ ,  $y^{lr} = 10,0 \text{ мм}$ .

## 2.7. Алгоритм расчета формы свободного контура плода томата как изначально сферического модельного тела

Текущий случай полностью соответствует рис. 2.14 и условиям задачи (подраздел 2.2), а предлагаемый ниже алгоритм в существенной мере перекликается с работой [87], но содержит ряд принципиальных отличий. Основное из них — это расчет геометрии свободного контура модельного тела. В случае из работы [87] геометрия области предельного равновесия оставалась неизменной вне зависимости от интенсивности нагружения. В нашем случае, с ростом внешней нагрузки реальное и модельные тела деформируются.

Начинать теоретическое исследование изучаемых моделей из расчета формы свободных поверхностей необходимо прежде всего из-за того, что в таком случае отклонение полученных расчетных данных от реальных легче всего контролировать. Каждый исследователь хорошо представляет, каким должен быть плод томата до и после нагружения.

Если в результате расчетов мы не получим округлой формы, то текущий вариант модели, придется отклонить и перейти к следующей. Вариантов построения алгоритма расчета геометрии свободного контура (формы кривых  $L^u R^c$  и/или  $R^u R^c$ ) может быть два (рис. 2.14). В первом случае расчет начинается с поверхности верхнего пятна контакта  $L^u R^u$  (рис. 2.14А), а во втором — с центрального горизонтального сечения  $L^c R^c$  (рис. 2.14В).

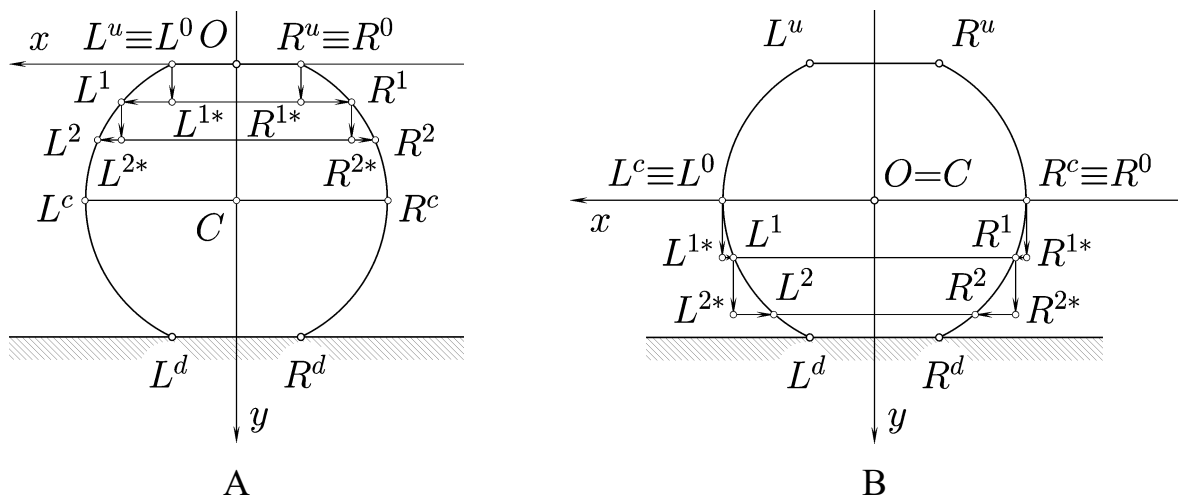


Рис. 2.14. Схема расчета геометрии свободного контура плода томата как изначально сферического тела: А — начиная с верхнего пятна контакта  $L^u R^u$ ; В — начиная с центрального горизонтального сечения  $L^c R^c$ .

Собственно алгоритм расчета геометрии свободного контура и некоторых параметров напряженного состояния плода томата как изначально сферического модельного тела представлен на рис. 2.15, 2.16 и 2.17.

Блок операторов 1 (рис. 2.15) отвечает за ввод исходных данных. Все они перечислены в теле оператора. Неизвестной является только одна управляющая переменная  $iDirection$ . Если  $iDirection = 0$ , то расчет начинается от пятна контакта  $L^u R^u$  и далее следует вниз к центральному сечению  $L^c R^c$ , т.е. в соответствии с рис. 2.14А. Если  $iDirection = 1$ , — то от центрального горизонтального сечения  $L^c R^c$  и дальше опять вниз к нижнему пятну контакта  $L^d R^d$ , т.е. в соответствии с рис. 2.14В. Во втором случае система координат  $Oxy$  совмещена с центром тяжести модельного тела (точкой С).



Рис. 2.15. Алгоритм расчета геометрии свободного контура и некоторых параметров напряженного состояния плода томата, как изначально сферического модельного тела

Поскольку раньше мы условились, что напряженное состояние модельного тела считаем симметричным по отношению к горизонтальному сечению, проходящему через его центр тяжести, то в принципе неважно, какую часть модельного тела подвергать расчету — верхнюю или нижнюю. Но отраженный на рис. 2.14В вариант позволяет несколько упростить алгоритм, поэтому он и применяется. Опять-таки благодаря симметрии в дальнейшем цифры, полученные для нижней половины модельного тела, мы будем ассоциировать с верхней половиной. В частности это касается верхнего  $L^u R^u$  и нижнего  $L^d R^d$  пятен контакта.

Оператором 2 выполняется вычисление начального объема плода томата, как сферического модельного тела

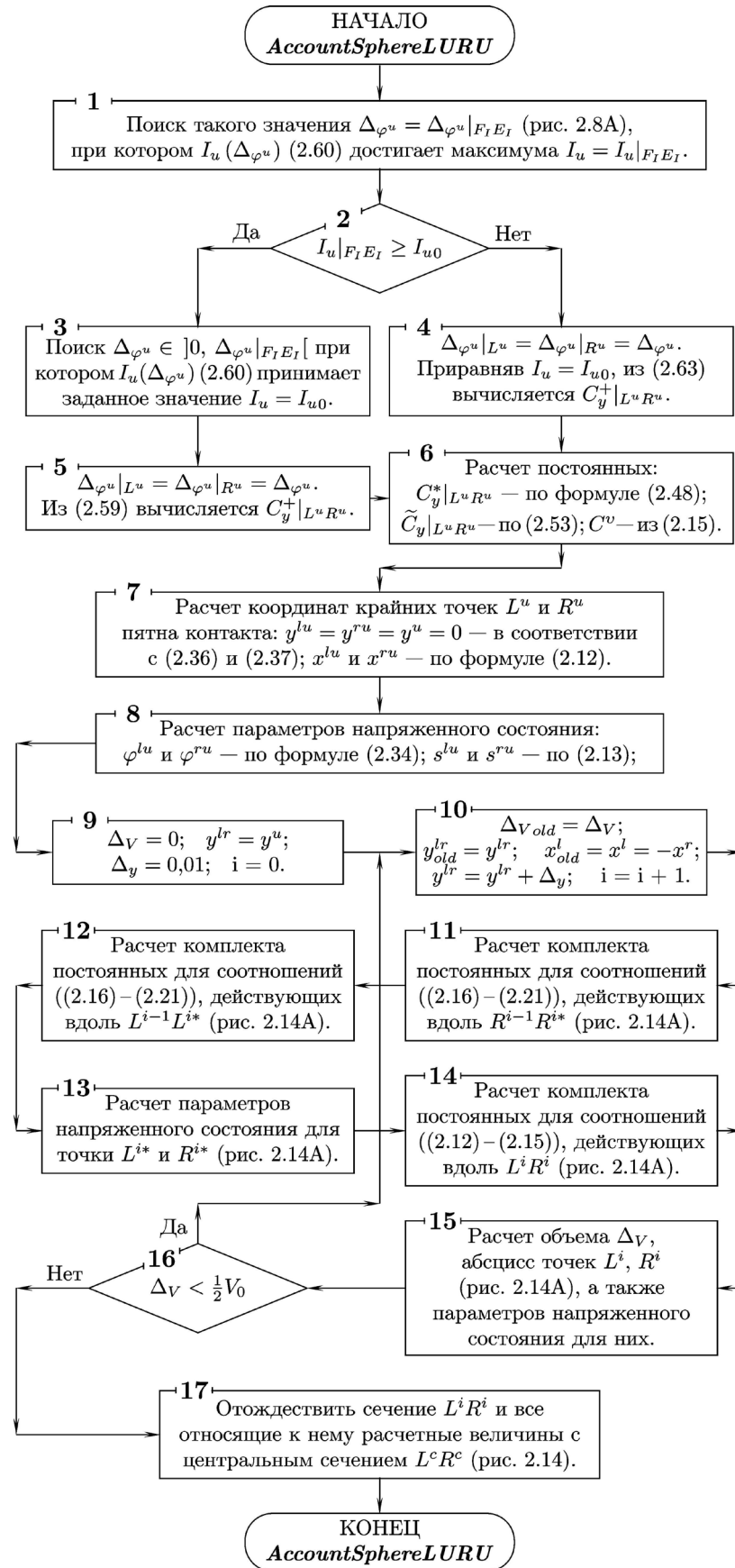
$$V_0 = \frac{1}{6} \pi D_0^3. \quad (2.68)$$

В процессе нагружения, поскольку среда несжимаемая, этот объем остается фиксированным и служит критерием для прекращения итераций. Если расчет идет по первому варианту (рис. 2.14А), то вычисления прекращаются, как только обчисленный объем  $\Delta_V$  модельного тела составит половину от начального  $V_0$ . Во втором случае ведения счета (рис. 2.14В) вычисления начинаются, когда  $\Delta_V = \frac{1}{2} V_0$ , а прекращаются, когда  $\Delta_V = V_0$ .

Оператор 3 осуществляет выбор. Если  $iDirection = 0$ , то далее вызывается подпрограмма *AccountSphereLURU* (оператор 4), а если  $iDirection = 1$ , — то *AccountSphereLCRC* (оператор 5). Первая реализует расчет в соответствии с (рис. 2.14А), а вторая — с (рис. 2.14В). В процессе их выполнения осуществляется вывод цифрового и графического материала (оператор 6).

Начало работы подпрограммы *AccountSphereLURU* (рис. 2.16), начинается с оператора 1, который методом деления отрезка пополам реализует поиск такого значения  $\Delta_{\varphi^u} = \Delta_{\varphi^u} |_{F_1 E_1}$  (рис. 2.8А), при котором  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  (2.60) достигает максимума интеграла внешней нагрузки  $I_u = I_u |_{F_1 E_1}$ .

Далее оператором 2 выполняется сравнение найденного значения  $I_u |_{F_1 E_1}$  с заданным  $I_{u0}$ .

Рис. 2.16. Алгоритм подпрограммы *AccountSphereLURU*

Если  $I_u|_{F_I E_I} \geq I_{u0}$ , то на пятне контакта экстремум  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  не достигается и вычисление переходит на блок операторов 3, который выполняет поиск такого значения  $\Delta_{\varphi^u} \in ]0, \Delta_{\varphi^u}|_{F_I E_I}[$ , при котором  $I_u(\Delta_{\varphi^u})$  (2.60) равно  $I_{u0}$ . В этом случае постоянная  $C_y^+|_{L^u R^u}$  удовлетворяет условию (2.59) по равенству, а, значит, может быть из него вычислена, что и выполняет оператор 5.

Если оператор 2 срабатывает в направлении «нет», то заданное значение  $I_{u0}$  интеграла внешней нагрузки больше экстремального  $I_{u0} > I_u|_{F_I E_I}$ , что соответствует ситуации, когда в условии (2.59) реализуется неравенство. В таком случае полученное выполнением блока операторов 1 значение  $\Delta_{\varphi^u}$  фиксируется, а величина постоянной  $C_y^+|_{L^u R^u}$  оператором 4 вычисляется из выражения (2.63), в котором предварительно выполняется замена  $I_u = I_{u0}$ .

По сути при выполнении операторов 1 – 5 (по схеме 1, 2, 3, 5 или 1, 2, 4) ситуация на пятне контакта  $L^u R^u$  становится определенной. Далее блоком операторов 6 реализуется расчет недостающих постоянных, вошедших в соотношения на абсциссе ((2.12)-(2.15)), которые выполняются вдоль  $L^u R^u$ . В частности, постоянной  $C_y^*|_{L^u R^u}$ , в соответствии с (2.48), присваивается нулевое значение, а значение постоянной  $\tilde{C}_y|_{L^u R^u}$  вычисляется по формуле (2.53). В заключение из выражения (2.2) вычисляется постоянная  $C^v$ . Значение последней остается верным для соотношений на абсциссе ((2.12)-(2.15)) и ординате ((2.16)-(2.21)), выполняющихся в любой точке модельного тела, находящегося в состоянии пластичности.

Оператор 7 выполняет расчет координат точек  $L^u$  и  $R^u$ . Ведь ординаты  $y^u = y^{lu} = y^{ru}$  (2.36) этих точек известны  $y^u = 0$  (2.37), а абсциссы  $x^{lu}$  и  $x^{ru}$ , ввиду симметричности позиционирования системы координат  $Oxy$  по отношению к модельному телу (рис. 2.1, 2.6 и 2.14) могут быть легко найдены из (2.52). Вычисление  $x^{lu}$  и  $x^{ru}$  по формуле (2.12) носит проверочный характер.

Далее блоком операторов 8 для крайних точек  $L^u$  и  $R^u$  пятна контакта выполняется расчет параметров напряженного состояния среды. В частности, с использованием выражения (2.34) рассчитываются значения углов  $\varphi^{lu}$  и  $\varphi^{ru}$ , а применив соотношение (2.13), получают значения  $s^{lu}$  и  $s^{ru}$ .

На этом этапе все необходимые параметры, относящиеся к пятну контакта  $L''R''$  вообще и его крайних точек  $L''$  и  $R''$  в частности, являются определенными. Чтобы стандартизовать дальнейшую часть алгоритма подпрограммы *AccountSphereLURU*, точки  $L''$  и  $R''$  отождествляются с точками  $L^i$  и  $R^i$ , где  $i = 0$ , (рис. 2.14А) и рассматриваются как начальные точки дальнейшего итерационного процесса (операторы 10-16). Теперь значение  $y''$  рассматривается как текущее значение ординаты  $y^{lr}$ , которое на данном этапе равно нулю. Над текущим сечением  $L^iR^i$  ( $i = 0$ ) в настоящий момент (после выполнения группы операторов 9) располагается нулевая часть объема модельного тела, т.е.  $\Delta_V = 0$ . Шаг дальнейших итераций по ординате (соответствующий приросту  $i$  на единицу) определяется переменной  $\Delta_y = 0,01$ .

Пять операторов из группы 10 выполняют запоминание координат (модуля абсциссы  $x_{old}^l$  и ординаты  $y_{old}^{lr}$ ) крайних точек  $L^i$ ,  $R^i$  текущего сечения и объема модельного тела  $\Delta_{V_{old}}$ , располагающегося над текущим сечением, а также приращение ординаты  $y^{lr}$  на величину  $\Delta_y$  и счетчика  $i$  — на единицу. Два последних действия по своей сути определяют перемещение текущего сечения модельного тела  $L^iR^i$  на один шаг в направлении оси ординат.

Группа операторов 11 и 12 выполняют расчет комплектов постоянных ( $\tilde{C}_x$  — из (2.17),  $C_x^*$  — из (2.16), а  $C_x^+$  — по формуле (2.21)) для соотношений ((2.16)-(2.21)), выполняющихся вдоль  $R^{i-1}R^{i*}$  и  $L^{i-1}L^{i*}$  соответственно.

Следующая группа операторов 13 выполняет расчет параметров напряженного состояния для внутренних точек  $L^{i*}$  и  $R^{i*}$  (рис. 2.14А) текущего сечения  $L^iR^i$ . Углы  $\varphi|_{L^{i*}}$  и  $\varphi|_{R^{i*}}$  вычисляются из (2.16), а полусуммы главных нормальных напряжений  $s|_{L^{i*}}$  и  $s|_{R^{i*}}$  — по (2.17).

Последующая группа операторов 14 выполняют расчет комплекта постоянных для соотношений ((2.12) - (2.15)), выполняющихся вдоль текущего сечения  $L^iR^i$ .  $C_y^*|_{L^iR^i} = 0$  — в соответствии с (2.57)48.  $\tilde{C}_y|_{L^iR^i}$  вычисляется по формуле (2.54), а  $C_y^+|_{L^iR^i}$  — определяется из соотношения (2.13).

Наиболее сложной является группа операторов 15. Их основная задача состоит в том, чтобы определить  $\Delta_{\varphi^{lr}}|_{L^iR^i}$ , и через него положение (абсциссы



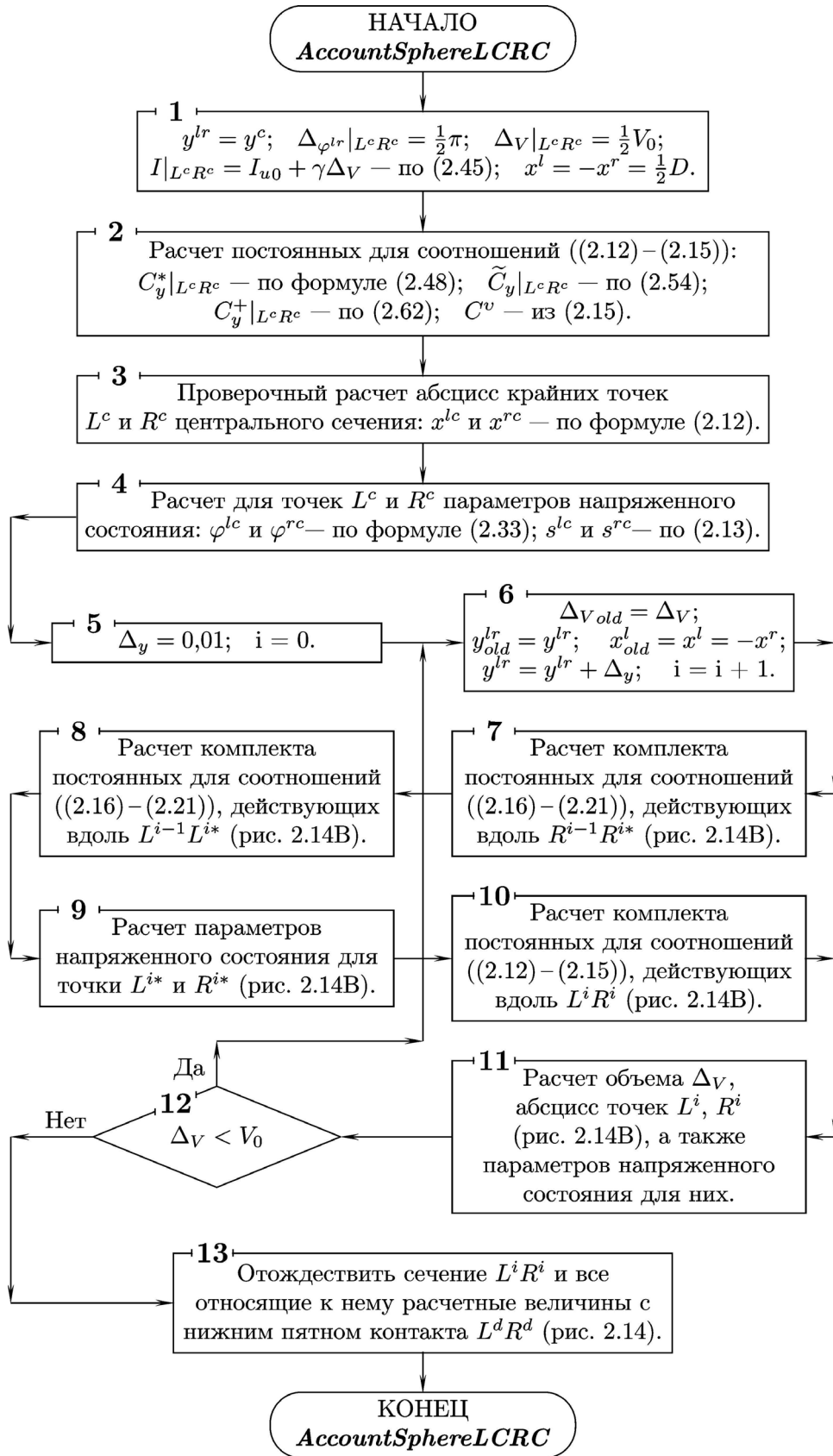
$x^l$  и  $x^r$  (2.12)) точек  $L^i$  и  $R^i$ . Уточняется это положение также с использованием метода деления отрезка пополам. Суть этой подзадачи состоит в том, чтобы найти такое значение  $x^l = x^r$ , при котором вновь вычисленный объем  $\Delta_V$  и вновь вычисленное значение интеграла  $I$  (2.61) удовлетворяли бы условию (2.45). При этом  $\Delta_V$  определяется по выражению  $\Delta_V = \Delta_{V_{old}} + V_k$ , где  $V_k = \frac{1}{3}\pi(x_{old}^l x_{old}^l + x^l x^l + x_{old}^l x^l)(y^{lr} - y_{old}^{lr})$  — объем усеченного конуса вписанного в часть модельного тела, располагающегося между текущим  $L^i R^i$  и предыдущим  $L^{i-1} R^{i-1}$  сечениями. После того, как условие (2.45) выполнено, используя соотношение (2.13), определяются полусуммы главных нормальных напряжений  $s|_{L^i}$  и  $s|_{R^i}$ .

Оператор 16 проверяет, достигнута ли половина высоты модельного тела: если «да», то итерации прекращаются, и текущее сечение  $L^i R^i$  отождествляется с центральным  $L^c R^c$ ; если «нет», то итерации продолжаются.

На этом алгоритм подпрограммы *AccountSphereLURU* (рис. 2.16) заканчивается, и управление передается в основную программу (рис. 2.15).

Параллельно с расчетом координат  $x^l = -x^r$  и  $y^{lr}$  точек свободного контура модельного тела подпрограмма *AccountSphereLURU* выполняет построение их геометрии в виде графиков, но на этом мы остановимся позже, а сейчас рассмотрим второй случай, когда ( $iDirection = 1$ ), т.е. когда расчет идет, начиная от центрального горизонтального сечения  $L^c R^c$  и дальше к нижнему пятну контакта  $L^d R^d$  (по рис. 2.14В). Этот алгоритм реализует подпрограмма *AccountSphereLCRC* (рис. 2.17).

По своей сути эта подпрограмма в существенной степени повторяет предыдущую *AccountSphereLURU*. Разница состоит в том, что напряженное состояние материала модельного тела в области центрального сечения  $L^c R^c$  известно заранее. Ведь выше уже говорилось, что свободный контур полностью состоит из главных площадок, а уровень сечения  $L^c R^c$  является единственным, где касательная плоскость к поверхности свободного контура не меняет своего положения и остается всегда вертикальной вне зависимости от величины интенсивности силового воздействия (величины  $I_u$ ).

Рис. 2.17. Алгоритм подпрограммы *AccountSphereLCRC*

Таким образом, для сечения  $L^c R^c$  очевидно, что  $\Delta_{\varphi^{lr}}|_{L^c R^c} = \frac{1}{2}\pi$ . Величина той части объема, которая располагается над сечением  $L^c R^c$  также известна:  $\Delta_V|_{L^c R^c} = \frac{1}{2}V_0$ . Следовательно, приравняв  $I_u = I_{u0}$ , можно непосредственным образом воспользоваться выражением (2.45) и определить интегральное значение  $I$  напряжений, действующих в интересующем сечении:  $I|_{L^c R^c} = I_{u0} + \gamma\Delta_V$ . Все эти действия выполняет группа операторов 1.

Далее операторы 2-4 выполняют расчет пакета постоянных для соотношений ((2.12) - (2.15)), проверочный расчет абсцисс  $x^{lc}$  и  $x^{rc}$  (2.12) крайних точек  $L^c$  и  $R^c$  сечения  $L^c R^c$  и параметров напряженного состояния, т.е. углов  $\varphi^{lc}$  и  $\varphi^{rc}$  — по формуле (2.33), а также полусумм главных напряжений  $s^{lc}$  и  $s^{rc}$  — по формуле (2.13) для этих же точек.

Ниже следующие операторы 5-13 практически полностью повторяют соответствующий фрагмент (операторы 9-4) подпрограммы *AccountSphereLURU* (рис. 2.16).

Кроме вышеизложенного, подпрограмма *AccountSphereLCRC*, аналогично предыдущей *AccountSphereLURU*, имеет операторы, отвечающие за построение графика вертикального сечения свободного контура модельного тела. На рис. 2.16 и 2.17 эти операторы не показаны.

С помощью таких графиков (рис. Б.1) мы имеем возможность, не проводя экспериментов, оперативно оценить адекватность приведенных моделей по отношению к решаемым задачам. Из рис. Б.1 следует, что полученные кривые свободного контура плода томата, рассматриваемого как изначально сферическое модельное тело, не отвечают реальности.

Объяснить такой результат можно только одним образом. Состояние пластичности сферического модельного и реального тел не соответствует плоскому случаю (рис. 2.4), который был положен в основу при разработке алгоритмов подпрограмм *AccountSphereLURU* и *AccountSphereLCRC*. Выход из сложившейся ситуации тоже только один. Необходимо использовать цилиндрическое модельное тело, для которого состояние пластичности (рис. 2.5) точно является двумерным.

## 2.8. Плод томата как цилиндрическое модельное тело

В дальнейшем условимся плод томата отождествлять с единичным отрезком горизонтального цилиндрического модельного тела бесконечной длины. В поперечном сечении оно соответствует рис. 2.1, 2.5, 2.6 и 2.14.

В таком случае заданное интегральное значение  $I'_{u0}$  внешней нагрузки должно составлять лишь некоторую часть от фактического интегрального значения  $I_{u0}$ , и в дальнейшем нам следует определить — какую часть, а выражения (2.61) и (2.68) для вычисления соответствующих величин, т.е. интегрального значения  $I(\Delta_{\phi^{lr}})$  действующей в текущем сечении  $LR$  нагрузки и начального объема  $V_0$  плода томата, использовать просто нельзя.

К вопросу о вычислении  $I'_{u0}$  вернемся позже, а сейчас взамен выражения (2.61), введем уже известное из работы [87] выражение

$$I(\Delta_{\phi^{lr}}) = 4k \exp\left(\frac{\gamma y - \tilde{C}_y}{2k}\right) [k \ln(\cos^2 \Delta_{\phi^{lr}}) + C_y^+ + k] \operatorname{tg} \Delta_{\phi^{lr}}, \quad (2.69)$$

а взамен (2.68) — новое

$$V_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2. \quad (2.70)$$

Как и раньше, предполагается, что объем  $V_0$  не зависит от величины интенсивности внешнего воздействия на плод и всегда остается постоянным.

Теперь из (2.69) получаем выражения для постоянной  $C_y^+$

$$C_y^+ = \frac{I(\Delta_{\phi^{lr}})}{4k \operatorname{tg} \Delta_{\phi^{lr}}} \exp\left(\frac{\tilde{C}_y - \gamma y}{2k}\right) - k [\ln(\cos^2 \Delta_{\phi^{lr}}) + 1], \quad (2.71)$$

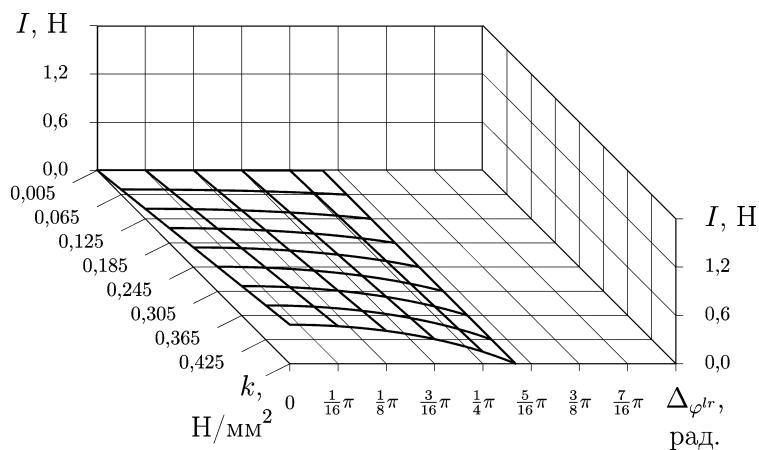
Если принять во внимание (2.54), а значения абсцисс  $x^l$  и  $x^r$  считать известными, то выражения (2.69) и (2.71) можно свести к упрощенному виду

$$I = (x^l - x^r) [k \ln(\cos^2 \Delta_{\phi^{lr}}) + C_y^+ + k], \quad (2.72)$$

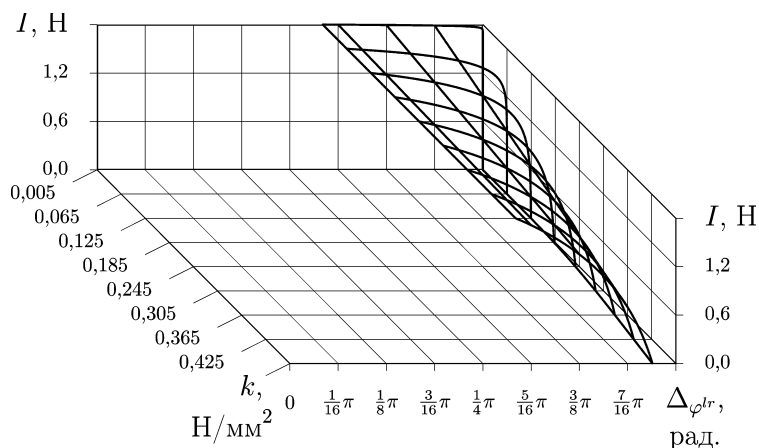
и

$$C_y^+ = \frac{I(\Delta_{\phi^{lr}})}{4k \operatorname{tg} \Delta_{\phi^{lr}}} - k [\ln(\cos^2 \Delta_{\phi^{lr}}) + 1]. \quad (2.73)$$

Характер функциональной зависимости  $I = I(k, \Delta_{\phi^{lr}})$  (2.72) иллюстрирует рис. 2.18.



А



В

Рис. 2.18. Функциональная зависимость  $I = I(k, \Delta_{\varphi^{lr}})$  (2.72), рассчитанные для случая, когда  $(x^l - x^r) = 1,0$  мм и к тому же:  
 А)  $C_y^+ = 0,0$  Н/мм<sup>2</sup>; В)  $C_y^+ = 1,8$  Н/мм<sup>2</sup>.

Как видим, зависимость величины  $I$  от значения  $\Delta_{\varphi^{lr}}$  носит монотонно убывающий характер. Чем больше  $\Delta_{\varphi^{lr}}$ , тем меньше  $I$ . Влияние  $k$  не столь однозначно. Если  $\Delta_{\varphi^{lr}} < \Delta_{\varphi^{lr}}|_{C_y^+=0; I=0}$ , где

$$\Delta_{\varphi^{lr}}|_{C_y^+=0; I=0} = \arccos[\exp(-\frac{1}{2})], \quad (2.74)$$

то зависимость  $I$  от  $k$  — монотонно возрастающая. Если же  $\Delta_{\varphi^{lr}} > \Delta_{\varphi^{lr}}|_{C_y^+=0; I=0}$  — то монотонно убывающая.

2.8.1 Обоснование заданного значения интеграла внешней нагрузки. Возвращаясь к определению  $I'_{u0}$ , перепишем выражения (2.61) и (2.69), введя новые обозначения

$$I_s(\Delta_{\varphi^{lr}}) = \frac{\pi(x^l - x^r)^2}{4} \left[ C_y^+ + k(1 - \text{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \right] \quad (2.75)$$

и

$$I_c(\Delta_{\varphi^{lr}}) = (x^l - x^r) [k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) + C_y^+ + k], \quad (2.76)$$

где  $I_s(\Delta_{\varphi^{lr}})$  и  $I_c(\Delta_{\varphi^{lr}})$  — интеграл полного напряжения, действующего в произвольном горизонтальном сечении  $LR$  для сферического и цилиндрического модельных тел соответственно.

Рис. 2.19 показывает, что отношение  $I_s/I_c$  как функция пластической постоянной  $k$  и  $\Delta_{\varphi^{lr}}$  по интервалу возможных значений  $\Delta_{\varphi^{lr}} \in ]0, \frac{1}{2}\pi [$  слева и справа имеет предел. В дальнейшем мы используем это обстоятельство для вычисления значения  $I'_{u0}$  по известному  $I_{u0}$ .

Для этого (см. приложение В) в начале определим предел отношения

$$\lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{I_s}{I_c} = \frac{\pi}{4} \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} (x^l - x^r) \frac{C_y^+ + k(1 - \text{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) + C_y^+ + k} = \frac{1}{4} \pi D. \quad (2.77)$$

Далее, принимая во внимание выражения (2.45) и (2.68), запишем предел числителя изучаемого отношения  $I_s/I_c$

$$\lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} I_s = I_{u0} + \gamma \frac{1}{12} \pi D_0^3, \quad (2.78)$$

и затем, обратившись к выражению (2.70), — предел знаменателя того же изучаемого отношения  $I_s/I_c$

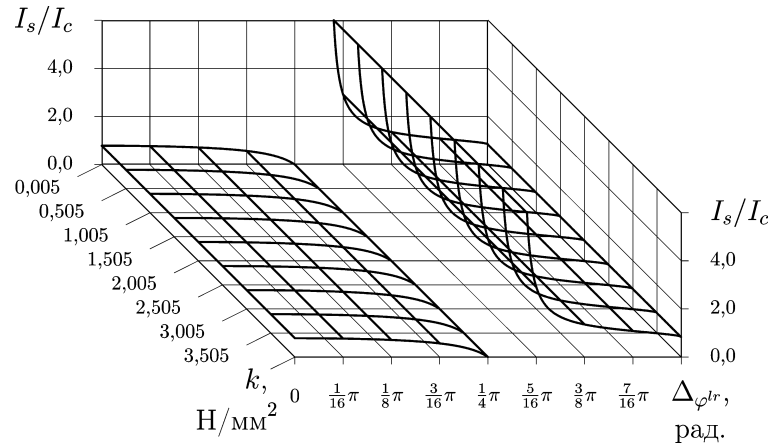
$$\lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} I_c = I'_{u0} + \gamma \frac{1}{8} \pi D_0^2. \quad (2.79)$$

В результате три последние выражения (2.77), (2.78) и (2.79) дают

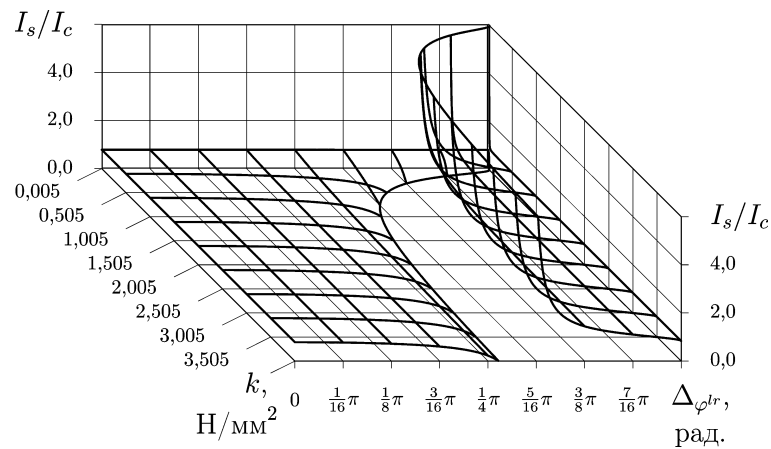
$$I'_{u0} = \frac{4I_{u0}}{\pi D} + \gamma D_0^2 \left( \frac{D_0}{3D} - \frac{\pi}{8} \right). \quad (2.80)$$

Все величины вошедшие в (2.80) известны.

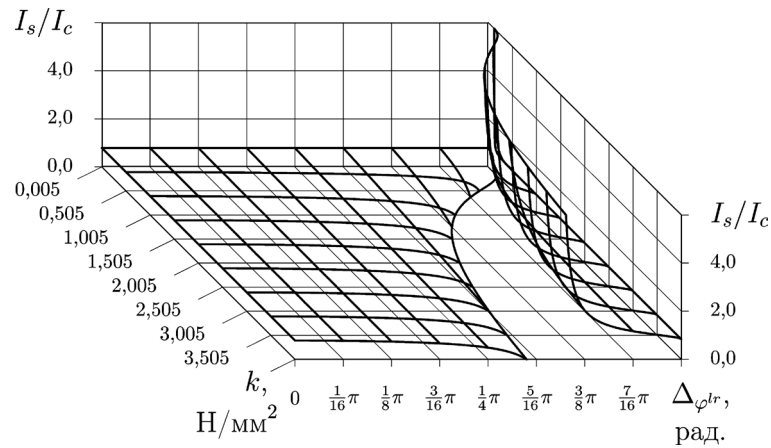
2.8.2 Алгоритм расчета формы свободного контура плода томата как изначально цилиндрического модельного тела. Основная программа (рис. 2.20), реализующая расчет формы свободного контура плода томата, в соответствии со схемой (рис. 2.14В), имеет ряд отличий от приведенной выше (рис. 2.15).



А



В



С

Рис. 2.19 Функциональная зависимость отношения  $I_s/I_c$  интегральных значений нагрузки  $I_s$  и  $I_c$ , действующей в текущем сечении сферического и цилиндрического модельных тел от величины пластической постоянной  $k$  и полуинтервала  $\Delta\varphi^{lr}$ . Расчеты соответствуют случаю, когда  $(x^l - x^r) = 1,0$  мм и

$C_y^+ = 0; 0,5$  и  $2,0$  Н/мм<sup>2</sup> (соответственно рисунки А, В и С).

В начале блок операторов 1, как и ранее, реализует ввод пакета исходных данных. За ним оператором 2, в соответствии с выражением (2.80), выполняется расчет величины  $I'_{u0}$  заданного интегрального значения внешней нагрузки. Далее оператором 3 выполняется вычисление начального объема  $V_0$  (2.70) единичного отрезка цилиндрического модельного тела.

Следующая и основная особенность рассматриваемого алгоритма состоит в том, что в нем заложена возможность расчета величины пластической постоянной  $k$  (операторы 4-7). Суть метода — в следующем.

В начале пластической постоянной  $k$  присваивается гарантированно завышенное значение  $k = k_{\max}$  (оператор 4) и задается ее элементарное приращение  $\Delta_k$  в цикле. Затем выполняется это приращение  $k = k_{\max} - \Delta_k$  (оператор 5) и подпрограмма *AccountCylinderLCRC* (оператор 6).

На особенностях подпрограммы *AccountCylinderLCRC* остановимся позже. А сейчас обратим внимание на то, что по итогу выполнения *AccountCylinderLCRC* полученные значения  $\sigma_{yy}|_{L^d}$  и  $\sigma_{yy}|_{R^d}$  должны быть положительными. Ведь мы имеем дело со сжимающим внешним воздействием и возможности «прилипания» плода томата к деформатору в области пятен контакта  $L^u R^u$  и  $L^d R^d$  не рассматриваем.

Если по факту оказывается, что  $\sigma_{yy}|_{L^d} = \sigma_{yy}|_{R^d} < 0$  (оператор 7), то значит заданное значение  $k$  является некорректным, и вычислительный процесс снова направляется на оператор 5, выполнением которого пластическая постоянная  $k$  уменьшается на  $\Delta_k$ . Так продолжается до тех пор, пока условный оператор 7 сработает в направлении «нет». Текущее значение пластической постоянной  $k$  запоминается как реальное, и оператором 8 выполняется вывод всех интересующих величин. При таком подходе на пятнах контакта  $L^u R^u$  и  $L^d R^d$  возможны только сжимающие воздействия.

Алгоритм подпрограммы *AccountCylinderLCRC* (рис. 2.22) практически повторяет *AccountSphereLCRC*. Важным является то, что в текущем случае вычисления проводятся в соответствии с формулами ((2.69)-(2.73)) и в выражении (2.45) вместо  $I_u$  используется не  $I_{u0}$ , как ранее, а новая величина  $I'_{u0}$ .



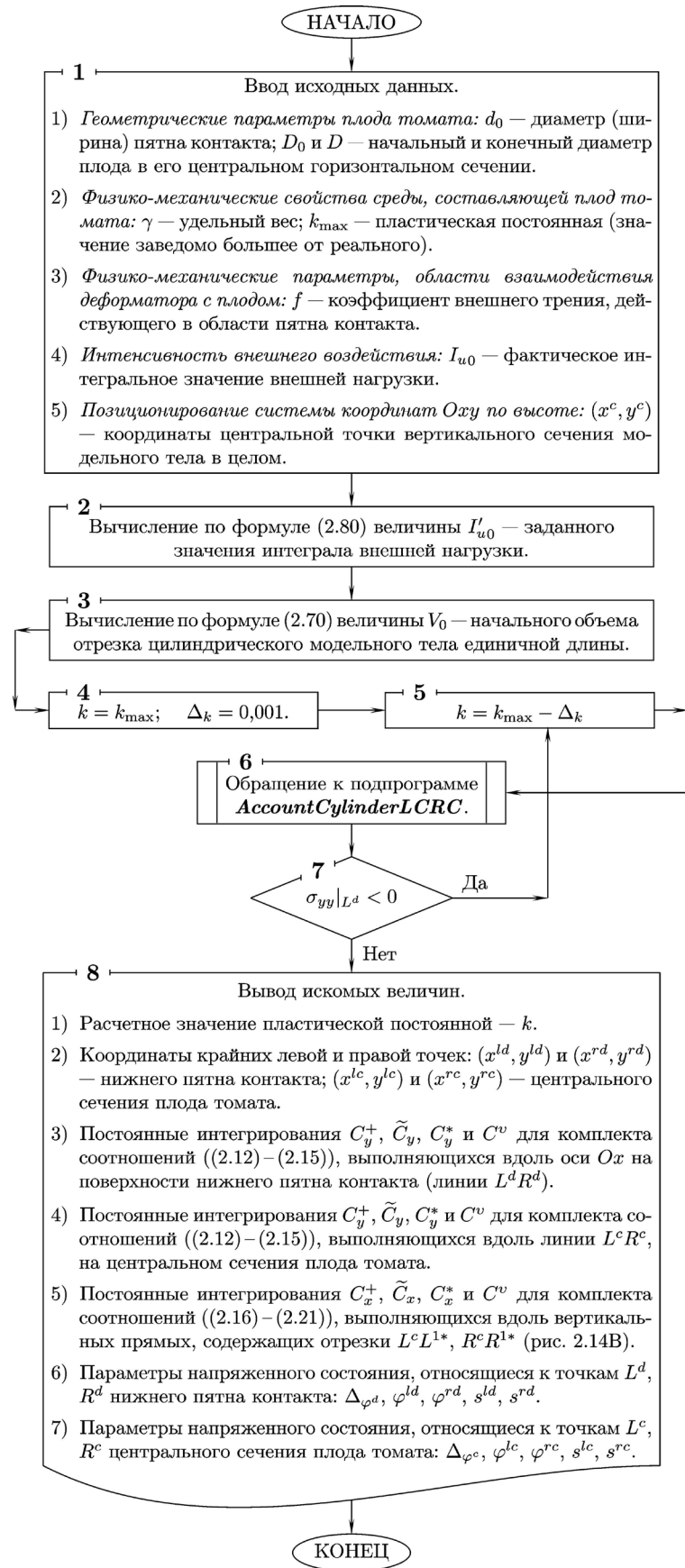
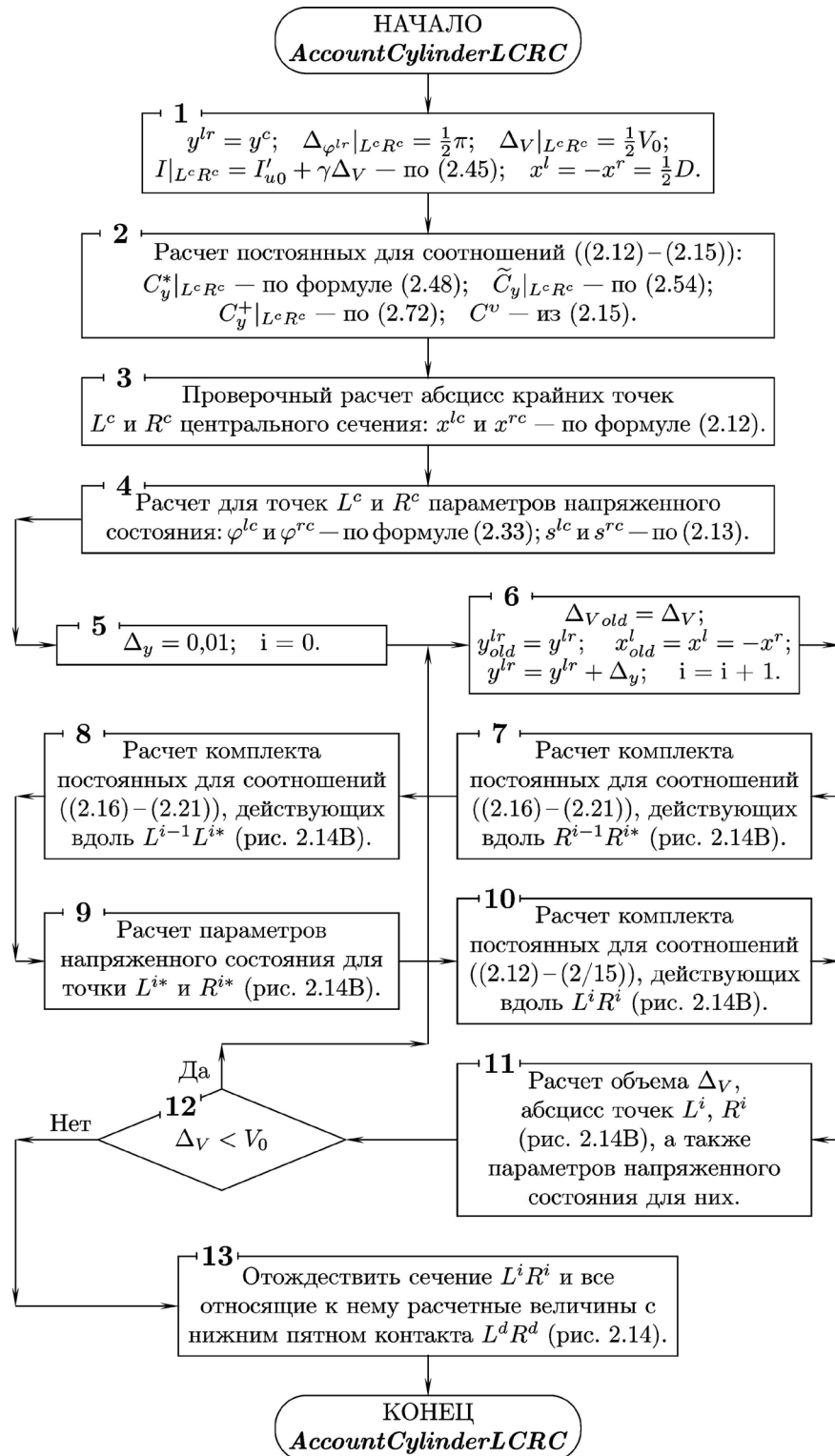


Рис. 2.20. Алгоритм расчета геометрии свободного контура и некоторых параметров напряженного состояния плода томата как изначально цилиндрического модельного тела

Рис. 2.21 Алгоритм подпрограммы *AccountCylinderLCRC*

2.8.3. Оценка адекватности предлагаемой математической модели. Оценить алгоритм расчета формы свободного контура плода томата как изначально цилиндрического модельного тела (рис. 2.20 и 2.21) можно, если, задавшись реальными начальными данными, посчитать геометрию свободного контура, а затем изучить влияние входных значений на результат.

Первый этап — начальные данные (табл.2.1) фиксированны.

Таблица 2.1

Начальные данные для расчета формы свободного контура плода томата, как изначально цилиндрического модельного тела

| Наименование параметра  | Единица измерения | Условное обозначение | Номинальное значение |
|---|-------------------|----------------------|----------------------|
| <i>Геометрические параметры плода томата:</i>                                 |                   |                      |                      |
| 1. Диаметр (ширина) пятна контакта  | мм                | $d_0$                | 30,0                 |
| 2. Начальный диаметр плода в его центральном горизонтальном сечении           | мм                | $D_0$                | 57,0                 |
| 3. Конечный диаметр плода в его центральном горизонтальном сечении            | мм                | $D$                  | 62,0                 |
| <i>Физико-механические свойства среды, составляющей плод томата:</i>          |                   |                      |                      |
| 4. Удельный вес   | Н/мм <sup>3</sup> | $\gamma$             | $0,9 \times 10^{-5}$ |
| 5. Начальное значение пластической постоянной                                 | Н/мм <sup>2</sup> | $k_{\max}$           | 6,0                  |
| <i>Параметры, области взаимодействия деформатора с плодом:</i>                |                   |                      |                      |
| 6. Коэффициент внешнего трения  |                   | $f$                  | 0,51                 |
| <i>Интенсивность внешнего воздействия:</i>                                    |                   |                      |                      |
| 7. Интегральное значение внешней нагрузки                                     | Н                 | $I_{u0}$             | 70,0                 |
| <i>Позиционирование системы координат Oxy по высоте:</i>                      |                   |                      |                      |
| 8. Координаты центральной точки вертикального сечения модельного тела в целом | мм                | $(x^c, y^c)$         | (0,0)                |

Промежуточные и конечные цифровые данные приведены в табл. 2.2. Прежде всего они нужны для осуществления ручной проверки согласованности расчетных значений постоянных интегрирования, геометрических параметров сечения модельного тела и параметров напряженного состояния последнего. Для полной оценки адекватности изучаемых явлений и применяемых моделей данных таблиц 2.1 и 2.2 недостаточно.

Таблица 2.2.

Промежуточные и конечные цифровые данные расчета формы свободного контура плода томата как изначально цилиндрического модельного тела

| Наименование параметра и комментарий   | Единица измерения | Условное обозначение | Номинальное значение |
|--|-------------------|----------------------|----------------------|
| 1  | 2                 | 3                    | 4                    |
| <i>Общие расчетные данные:</i>   |                   |                      |                      |
| 1. Скорректированное интегральное значение начальной нагрузки  | Н                 | $I'_{u0}$            | 1,435006556          |
| 2. Объем единичного отрезка цилиндрического модельного тела  | мм <sup>3</sup>   | $V_0$                | 2551,758632          |
| 3. Пластическая постоянная   | Н/мм <sup>2</sup> | $k$                  | 0,11948              |
| 4. Общая постоянная  | —                 | $C^v$                | 61,34453641          |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.12) – (2.15)), выполняющихся вдоль <math>L^c R^c</math> (рис. 2.14В)</i>                          |                   |                      |                      |
| 5.   | мм                | $C_y^*$              | 0,0                  |
| 6.   | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_y$        | 2,688933086          |
| 7.   | Н/мм <sup>2</sup> | $C_y^+$              | 3,755430612          |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.16) – (2.21)), выполняющихся вдоль <math>L^c L^{1*}</math> (рис. 2.14В)</i>                       |                   |                      |                      |
| 8.   | мм                | $C_x^*$              | $3,1 \times 10^{-6}$ |
| 9.   | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_x$        | -1,16264705          |
| 10.  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_x^+$              | -0,0961495248        |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.16) – (2.21)), выполняющихся вдоль <math>R^c R^{1*}</math> (рис. 2.14В)</i>                       |                   |                      |                      |
| 11.  | мм                | $C_x^*$              | $3,1 \times 10^{-6}$ |
| 12.  | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_x$        | -1,162647049         |
| 13.  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_x^+$              | -0,096149524         |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.12) – (2.15)), выполняющихся вдоль оси абсцисс на нижнем пятне контакта <math>L^d R^d</math>:</i> |                   |                      |                      |
| 14.  | мм                | $C_y^*$              | 0,0                  |
| 15.  | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_y$        | -1,099074654         |
| 16. Принятое расчетное значение  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_y^+$              | -0,0325771286        |
| 17. Минимально возможное значение по условию трения (2.12)   | Н/мм <sup>2</sup> | $C_y^+$              | -0,11948             |

| 1  | 2                 | 3                    | 4            |
|--|-------------------|----------------------|--------------|
| <i>Геометрические параметры свободного контура нагруженного модельного тела:</i> |                   |                      |              |
| 18. Абсциссы точек (рис. 2.4В): $L^c$ ;  | мм                | $x^{lc}$             | 31,00000002  |
| 19. $R^c$ ;  | мм                | $x^{rc}$             | -30,99999991 |
| 20. $L^d$ ;  | мм                | $x^{ld}$             | 13,06306921  |
| 21. $R^d$ .  | мм                | $x^{rd}$             | -13,06306921 |
| 22. Ордината нижнего пятна контакта $L^d R^d$                                    | мм                | $y^{ld} = y^{rd}$    | 23,78        |
| 23. Диаметр (ширина) нижнего пятна контакта $L^d R^d$                            | мм                | $x^{ld} - x^{rd}$    | 26,12613842  |
| 24. Максимальный диаметр (ширина) нагруженного модельного тела                   | мм                | $x^{lc} - x^{rc}$    | 61,99999993  |
| <i>Параметры напряженного состояния:</i>   |                   |                      |              |
| 25. Угловой параметр для сечений: $L^c R^c$ ;                                    | рад.              | $\Delta_{\varphi^c}$ | 1,570796227  |
| 26. $L^d R^d$ .  | рад.              | $\Delta_{\varphi^d}$ | 0,5023286735 |
| 27. Полусумма главных нормальных напряжений $s$ для точек: $L^c$ ;               | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{lc}$             | -0,096149525 |
| 28. $R^c$ ;  | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{rc}$             | -0,096149524 |
| 29. $L^d$ ;  | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{ld}$             | -0,064086376 |
| 30. $R^d$ .  | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{rd}$             | -0,064086376 |

Для этих целей больше подходит графический материал (рис. 2.22). На этом рисунке жирной линией изображена правая верхняя четверть  $R^u R^c$  свободного контура нагруженного модельного тела, а более тонким пунктиром — соответствующая часть свободного контура модельного тела до приложения силового воздействия. Тонкими стрелками показаны направления действия большего из главных нормальных напряжений  $\sigma_3$ . Как и ранее (рис. 2.6), слово «направление» применяется формально, поскольку  $\sigma_3 = 0$ .

В идеальном случае стрелки должны всегда быть ориентированны по нормали к свободному контуру. В данном случае имеем незначительное отклонение от нормали, однако такой результат следует считать приемлемым. Более высокую точность можно получить применяя алгоритмы прецизионных вычислений и соответственно более мощную вычислительную технику.

Сам же свободный контур (отрезок  $R^u R^c$ ) по форме в точности соот-

ветствует реальному объекту.

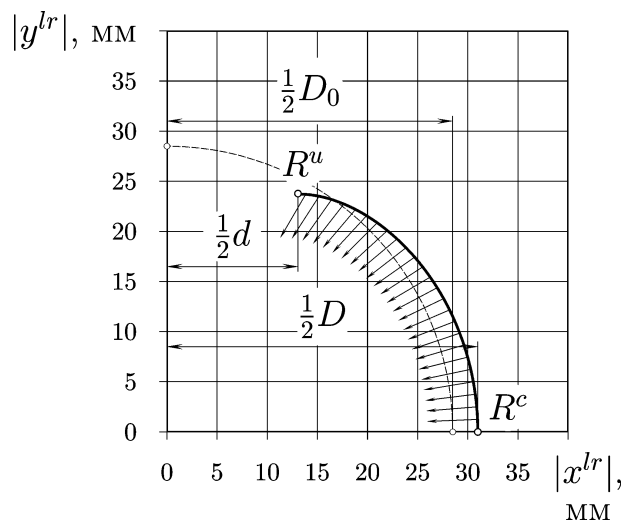


Рис. 2.22. Правая верхняя часть  $R^u R^c$  свободного контура нагруженного модельного тела до (тонкий пунктир) и после (жирная сплошная линия) нагружения

Далее нам следует оценить, как влияют исходные данные (табл.2.1) на устойчивость результата.

*Второй этап* — начальные данные изменяются в некоторых (реальных) пределах.

Сначала рассмотрим пример некорректных исходных данных и прокомментируем их. Для этого положим, что  $k_{\max} = 0,09 \text{ Н/мм}^2$ , а остальные входные данные оставим как есть (табл. 2.1). Далее применим программу (рис. 2.20). В таком случае группа операторов 4-7 выполняется один раз. Причина —  $\sigma_{yy} |_{L^d}$  получается положительным уже после первого прохода, а, значит, оператор 7 сразу срабатывает в направлении «нет». Результаты расчетов иллюстрирует рис. 2.23.

Как видим, появившийся излом и участок свободного контура  $R^u R^c$  очевидно не соответствует действительности. Дело в том, что уменьшение пластической постоянной  $k$  с  $0,11948$  до  $0,09 \text{ Н/мм}^2$  реально означает, что материал, составляющий модельное тело, стал более податливым (мягким). Следовательно, при той же интенсивности внешнего силового воздействия

$I_{u0} = 70,0$  Н модельное тело должно деформироваться сильнее. Такому условию отвечают два варианта: а) при прежнем значении  $D_0 = 57,0$  мм величина  $D$  должна быть больше заданного значения 62,0 мм; б) при прежнем значении  $D = 62,0$  мм величина  $D_0$  должна быть меньше 57,0 мм.

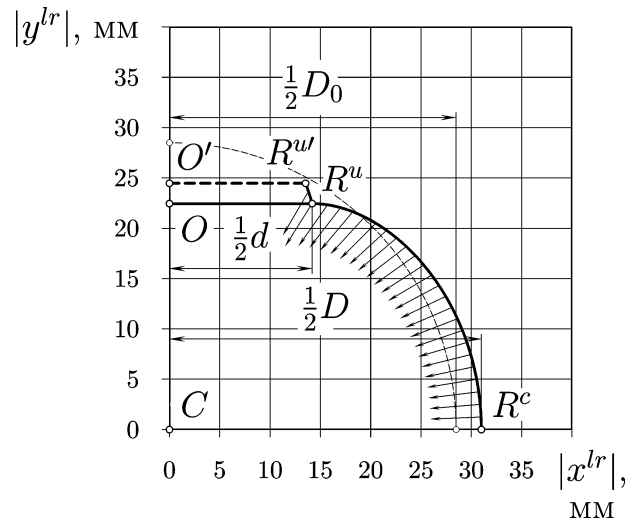


Рис. 2.23. Правая верхняя часть  $OR^uR^c$  контура поперечного сечения нагруженного модельного тела (рис. 2.14А) до (тонкий пунктир) и после (жирная сплошная линия) нагружения, для случая, когда в исходные данные (табл. 2.1) внесена корректировка, т.е. когда  $k_{\max} = 0,09$  Н/мм<sup>2</sup>

Справедливость последнего (варианта «б») вытекает непосредственно из анализа рис. 2.23. Объем модельного тела, соответствующий четырехугольнику  $OO'R^u'R^u$ , является «излишним». Обратимся к оператору 12 подпрограммы *AccountCylinderLCRC* (рис. 2.21). Понятно, что если величину  $V_0$  уменьшить настолько, чтобы итерации прекратились, как только будет построена точка  $R^u$ , то проблемного участка  $OO'R^u'R^u$  поперечного сечения модельного тела не появится. В свою очередь,  $V_0$  станет меньшим, если уменьшить заданное значение  $D_0$ . Последнее непосредственно следует из (2.70). В данном случае проблем не возникает (рис. 2.24А), если положить, что  $D_0 = 55,74155$  мм, в то время как  $D$  по-прежнему равно 62,0 мм.

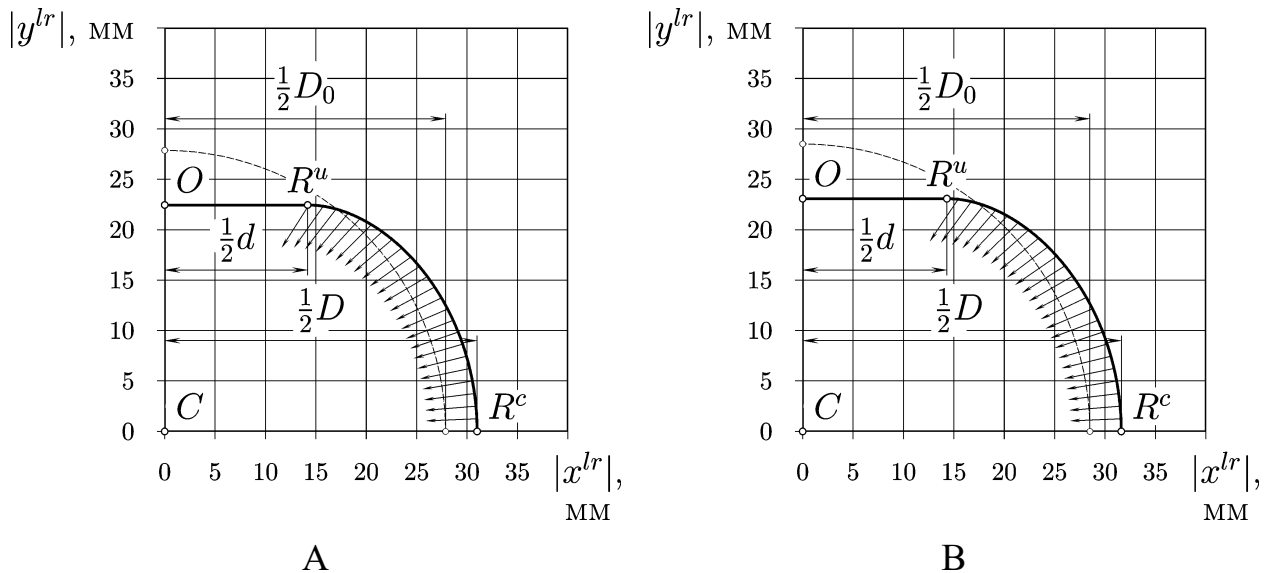


Рис. 2.24. Правая верхняя часть  $OR^uR^c$  контура поперечного сечения нагруженного модельного тела (рис. 2.14А) до (тонкий пунктир) и после (жирная сплошная линия) нагружения для случая, когда в исходные данные (табл. 2.1) внесена корректировка, т.е. когда  $k_{\max} = 0,09 \text{ Н/мм}^2$ ; и кроме того:

А) —  $D_0 = 55,74155 \text{ мм}^2$  при прежнем  $D = 62,0 \text{ мм}$ ;

В) —  $D = 63,21644 \text{ мм}^2$  при прежнем  $D_0 = 57,0 \text{ мм}^2$

Теперь рассмотрим вариант «а», когда фиксированным остается  $D_0 = 57,0 \text{ мм}$ , а значение  $D$  увеличивается до необходимого. Как видим из рис. 2.24В, в случае, когда  $D = 63,21644 \text{ мм}$ , некорректностей не возникает.

Остается проверить, насколько реальными будут расчеты свободного контура нагруженного модельного тела, если величины  $I_{u0}$  и  $k$  варьировать в достаточных для практики пределах (рис. 2.25).

Как видим, модельное тело тем интенсивнее проседает, чем больше внешняя нагрузка  $I_{u0}$  и чем меньше пластическая постоянная  $k$ . На рис. 2.25А показаны только две кривые. Если при  $k = 0,01 \text{ Н/мм}^2$  нагрузку увеличить до  $I_{u0} = 30,0 \text{ кН}$ , то появляется неадекватность по типу той, что показана на рис. 2.23. Это означает, что модельное тело не выдерживает и разрушается. Все вышеприведенное, включая численные данные, в точности соответствует поведению реального объекта — плода томата.

Таким образом, можно заключить, что оба рассмотренные варианты «а» и «б» являются достоверными.



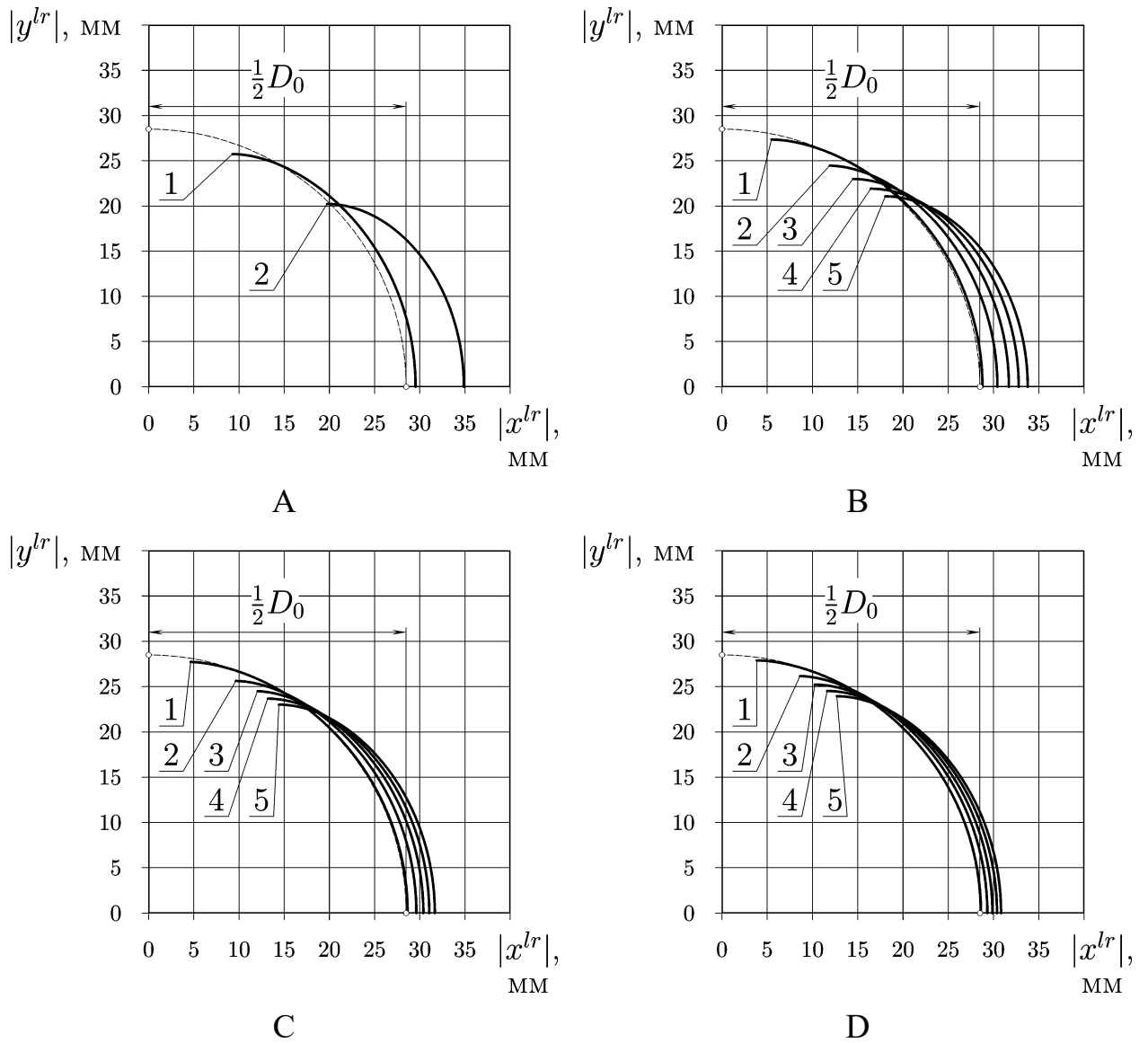


Рис. 2.25. Правая верхняя часть  $OR^u R^c$  контура поперечного сечения нагруженного модельного тела (рис. 2.14А) до (тонкий пунктир) и после нагружения с различной интенсивностью (жирные сплошные линии: 1 —  $I_{u0} = 1,0$  кН; 2 —  $I_{u0} = 20,0$  кН; 3 —  $I_{u0} = 40,0$  кН; 4 —  $I_{u0} = 60,0$  кН; 5 —  $I_{u0} = 80,0$  кН), для случая, когда в исходные данные (табл. 2.1) внесена корректировка, т.е. максимальный наружный диаметр  $D$  вычисляется, а пластическая постоянная  $k$  фиксирована, т.е. когда: А) —  $k = 0,01$  Н/мм<sup>2</sup>; В) —  $k = 0,05$  Н/мм<sup>2</sup>; С) —  $k = 0,1$  Н/мм<sup>2</sup>; D) —  $k = 0,15$  Н/мм<sup>2</sup>

## 2.9. Критерий разрушения плода томата

Испытания томатов на разрушение в случае сжатия их между двумя жесткими горизонтальными пластинами показывают, что в процессе нагружения, прежде чем плод разрушится он в существенной мере деформируется. Для оценки величины деформации введем коэффициент

$$\delta = \frac{h}{h_0}, \quad (2.81)$$

который назовем *коэффициентом деформации*, акцентируя внимание на том, что вычисляется он как отношение текущей (в процессе нагружения) высоты томата  $h$  к ее начальному значению  $h_0$ .

Поскольку, в соответствии с ранее принятыми допущениями, в процессе теоретических исследований плод томата подменяется модельным телом правильной формы (либо сферическим, либо цилиндрическим), то коэффициент деформации можно определить и по-другому:

$$\delta = \frac{h}{D_0}. \quad (2.82)$$

Возможно также определение коэффициента деформации и через отношение разностей координат, т.е.

$$\delta = \frac{y^d - y^u}{D_0} = 2 \frac{y^c - y^u}{D_0} = 2 \frac{y^d - y^c}{D_0}, \quad (2.83)$$

где  $y^d = y^{ld} = y^{rd}$  — ордината точек нижнего пятна контакта  $L^d R^d$ .

Когда  $h = h_0$ , т.е. когда нет внешнего силового воздействия на плод  $\mathbf{P} = 0$ , учитывая, что  $h_0 = D_0$ , коэффициент деформации равен единице,  $\delta = 1$ . Чем больше интенсивность внешнего силового воздействия, тем меньше  $\delta$ . Разрушение плода происходит, когда  $\delta$  достигает какого-то минимального значения  $\delta_{\min}$ . По этой причине целесообразно условиться, что впредь в качестве критерия разрушения плодов будем понимать минимально достижимую величину  $\delta_{\min}$  коэффициента деформации  $\delta$ . Числовое значение  $\delta_{\min}$  определяется экспериментальным путем.

По-другому величину деформации плода в ходе нагружения можно оценить, воспользовавшись отношением

$$\delta' = \frac{D_0}{D} \quad (2.84)$$

диаметров плода (ширины модельного тела) до  $D_0$  и после  $D$  нагружения. Параметр  $\delta'$  разумно называть *коэффициентом изменения диаметра*. Его величина функционально связана с величиной уже определенного коэффициента  $\delta$ . Это обстоятельство иллюстрирует рис. 2.26.

Закономерности, которые иллюстрирует рис. 2.26, весьма логичны. Внешний диаметр  $D$  тем больше, чем интенсивнее внешнее воздействие, т.е. чем больше  $I_{u0}$ . Связь коэффициентов  $\delta$  и  $\delta'$  с величиной  $I_{u0}$  — обратная. Чем интенсивнее внешнее воздействие, тем меньше значения обоих коэффициентов. К тому же, при прочих равных обстоятельствах плод (модельное тело) деформируется тем больше, чем меньше его пластическая постоянная.

В дальнейшем условимся использовать только коэффициент усадки  $\delta$ .

## 2.10. Задача о взаимодействии плодов томатов между собой и с жестким плоским деформатором одновременно

### 2.10.1. Постановка задачи.

Условие текущей задачи (рис. 2.27) в значительной мере повторяет уже рассмотренную ранее (рис. 2.1) из подраздела 2.2. Все принятые там допущения и начальные условия остаются в силе и сейчас. Специфика текущего случая состоит только в том, что испытуемый плод 1 (рис. 2.27) находится в тесном (изначально без зазоров) окружении других таких же и по форме, и по комплексу физико-механических свойств томатов. При этом плоды окружения 4 и 5, а также множества других, которые на рисунке не показаны, испытывают такие же механические воздействия, как и сам испытуемый плод 1. Причем все изменения интенсивности внешнего воздействия, равно, как и реакция на них со стороны плодов, протекает абсолютно синхронно.

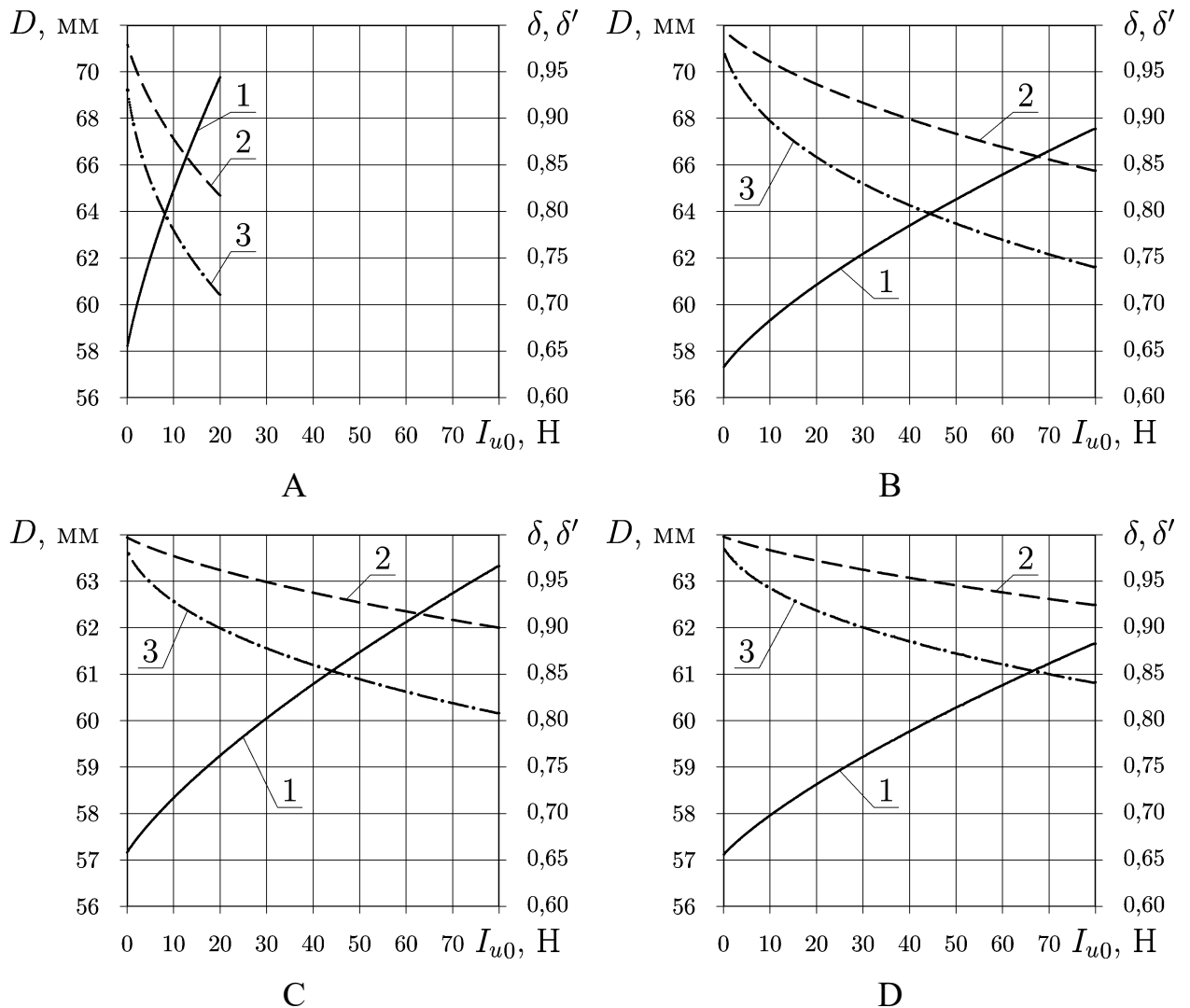


Рис. 2.26. Связь величин внешнего диаметра плода (ширины модельного тела)  $D$  (1), коэффициента деформации  $\delta$  (3) и параметра  $\delta'$  (2) с интенсивностью внешнего силового воздействия  $I_{u0}$  для случая, когда в исходные данные (табл. 2.1) внесена корректировка, т.е. максимальный наружный диаметр  $D$  вычисляется, а пластическая постоянная  $k$  фиксирована, т.е. когда: А) —  $k = 0,01 \text{ Н/мм}^2$ ; В) —  $k = 0,05 \text{ Н/мм}^2$ ; С) —  $k = 0,1 \text{ Н/мм}^2$ ; D) —  $k = 0,15 \text{ Н/мм}^2$

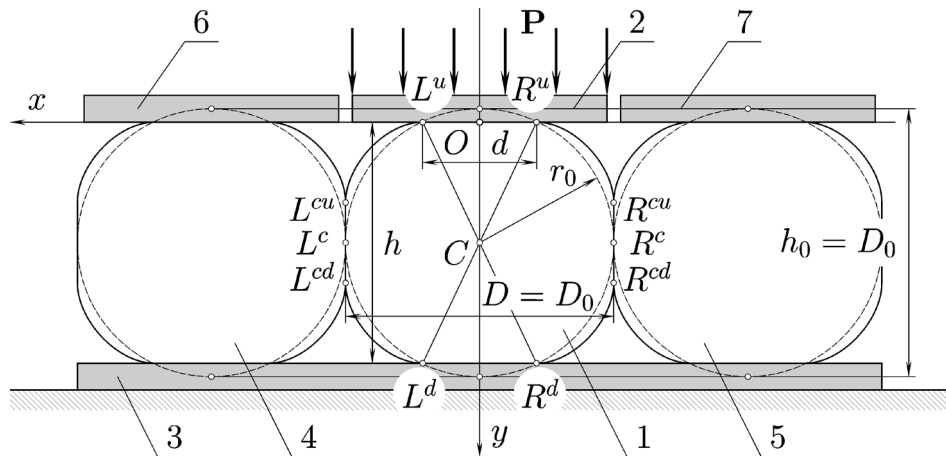


Рис. 2.27 Схема взаимодействия плода томата с жестким плоским деформатором для случая когда, испытуемый плод находится в тесном окружении таких же плодов, испытывающих аналогичные силовые воздействия: 1 — испытуемый плод; 2 — деформатор, воздействующий на испытуемый плод; 3 — общая жесткая опорная поверхность; 4, 5 — плоды окружения; 6, 7 — деформаторы, воздействующие на плоды окружения

В таком случае, в результате взаимодействия с плодами окружения, на боковых поверхностях испытуемого плода 1 появляется пара новых круглых пятен контакта с диаметрами —  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$ . Есть и другие, например, спереди и сзади по отношению к плоскости рисунка, но они, с целью упрощения, на рис. 2.27 не показаны. В дальнейшем несколько упростим ситуацию и условимся считать, что все боковые пятна контакта испытуемого плода сливаются в одну цилиндрическую поверхность вращения, у которой вертикальные отрезки  $L^{cu}L^{cd}$  и/или  $R^{cu}R^{cd}$  служат образующими, а направляющей — горизонтальная окружность с диаметром  $D = D_0$ .

В начальный момент нагружения, когда  $P = 0$ , три точки слева  $L^{cu}$ ,  $L^c$ ,  $L^{cd}$ , равно, как и три точки справа  $R^{cu}$ ,  $R^c$ ,  $R^{cd}$ , совпадают, а боковое пятно контакта (теперь оно цилиндрическое, и потому одно) по площади равно нулю. В процессе роста  $P$  расстояния между точками  $L^{cu}$  и  $L^{cd}$ , а также между  $R^{cu}$  и  $R^{cd}$  увеличиваются, достигая своего максимума в момент разрушения плодов. Это происходит, когда величина коэффициента деформации  $\delta$  достигает своего критического (минимально возможного) значения  $\delta_{\min}$ .

Поскольку по условию текущей задачи испытуемый плод и плоды окружения абсолютно одинаковы, и процесс их нагружения протекает также

абсолютно одинаково, то можно заключить, что деформируясь в ходе роста внешней нагрузки  $P$ , плоды деформируются в точности синхронно. В силу этой синхронности, трение между плодами не возникает, а, значит, в пределах бокового цилиндрического пятна контакта в целом и вдоль вертикальных образующих  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$ , в частности, все реактивные силы ориентированы горизонтально, а касательных напряжений нет вовсе.

2.10.2. Адаптация условия задачи к случаю с цилиндрическими модельными телами. Напомним, что решение ранее поставленной задачи (рис. 2.1) из раздела 2.2 проводилось при условии, когда реальный плод томата подменялся цилиндрическим модельным телом (подраздел 2.8,) и при этом были получены результаты с весьма высокой адекватностью (пункт 2.8.3). Следовательно, в текущем случае (задача о взаимодействии плодов томатов между собой и с жестким плоским деформатором одновременно) поступаем также и подменяем реальные почти сферические плоды томатов бесконечно длинными горизонтальными круговыми цилиндрами.

После такой замены рис. 2.27 остается в силе. Разница состоит только в том, что теперь у испытуемого модельного тела 1 можно различать левое и правое боковые плоские вертикально ориентированные прямоугольные пятна контакта, конечные стороны которых параллельны отрезкам  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$ , а бесконечно длинные ориентированы по нормали к плоскости листа. В дальнейшем отрезки  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$  мы условимся отождествлять с самими пятнами контакта, соответственно левым и правым.

Координаты крайних точек  $L^{cu}$ ,  $L^{cd}$  и  $R^{cu}$ ,  $R^{cd}$  этих отрезков обозначим соответственно  $(x^{lcu}, y^{lcu})$ ,  $(x^{lcd}, y^{lcd})$  и  $(x^{rcu}, y^{rcu})$ ,  $(x^{rcd}, y^{rcd})$ . При этом, задав координаты  $(x^c, y^c)$ , мы можем изменять взаимное расположение испытуемого модельного тела и системы координат  $Oxy$ , но обозначения самих координат всех ранее объявленных точек менять при этом не будем.

С учетом принятых обозначений высота  $h^c$  боковых пятен контакта  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$  составит

$$h^c = y^{rcd} - y^{rcu} = 2(y^{rcd} - y^c) \quad \text{или} \quad h^c = y^{lcd} - y^{lcu} = 2(y^{lcd} - y^c). \quad (2.85)$$

Введем обозначение  $h_0^c$  — начальное значение высоты боковых пятен контакта  $h^c$ . Величину  $h_0^c$  всегда можно приравнять нулю, но чтобы ускорить расчеты (применение алгоритма, который будет приведен ниже), удобнее все же задать  $h_0^c$ , но только так, чтобы выполнялось условие:  $h_0^c \leq h^c$ .

2.10.3. Алгоритм решения задачи о взаимодействии плодов томатов между собой и с жестким плоским деформатором одновременно. Текущий алгоритм, равно как и задача которой он посвящен, является развитием уже рассмотренного ранее (рис. 2.14В, 2.20 и 2.21). Новая схема расчета (рис. 2.28) практически полностью повторяет предыдущую (рис. 2.14В). Как и ранее, вычисления начинаются от середины (сечение  $L^c R^c$ ) и направляются вниз, к нижнему пятну контакта  $L^d R^d$ . Отличие состоит только в том, что теперь имеются вертикальные участки  $L^c L^{cd}$  и  $R^c R^{cd}$  боковых пятен контакта  $L^{cu} L^{cd}$  и  $R^{cu} R^{cd}$  (рис. 2.27). В процессе вычислений высота  $h^c$  пятен контакта  $L^{cu} L^{cd}$  и  $R^{cu} R^{cd}$  последовательно увеличивается от  $h_0^c$  до требуемого значения, при котором удовлетворяется ряд условий, на которых остановимся позже, рассматривая алгоритмы рис. 2.29 и рис. 2.30. В границах криволинейных частей  $L^{cd} L^d$  и  $R^{cd} R^d$  бокового контура модельного тела расчет ведется в точности, как раньше.

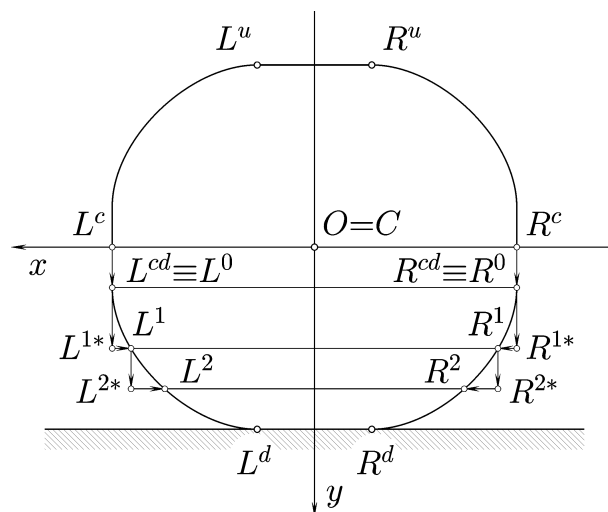


Рис. 2.28. Схема расчета геометрии свободного контура плода томата (изначально цилиндрического модельного тела бесконечной длины)



Рис. 2.29. Алгоритм расчета геометрии свободного контура и некоторых параметров напряженного состояния плода томата (изначально цилиндрического модельного тела бесконечной длины), находящегося в окружении других таких же плодов



Основная программа (рис. 2.29) начинается блоком операторов 1, осуществляющих ввод известных величин (табл. 2.5). Начальный и конечный диаметры  $D_0$  и  $D$  равны между собой. Пластическая постоянная  $k$  теперь считается известной, равно как и все остальные величины, перечисленные в пунктах 3) – 5) блока операторов 1.

Ввод отличного от нуля начального значения  $h_0^c$  обусловлен целью сокращения времени и повышения надежности работы алгоритма. Последнее также связано с желанием упростить алгоритм и, тем самым, повысить его наглядность. Задавая исходные данные, по величине близкими к реальным, можно исключить из алгоритма ряд проверок и согласований. Прежде всего, это относится к согласованию элементарных приращений в циклах.

Операторы 2 и 3 нам уже известны, а два следующих (4 и 5) — другие. По своей сути они также повторяют операторы 4 и 5 алгоритма рис. 2.20, но относятся к подбору значения другого параметра. Если ранее подбиралась величина пластической постоянной  $k$ , то сейчас — высота  $h^c$  боковых пятен контакта  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$  (рис. 2.27).

Далее (оператор 6) следует вызов подпрограммы *AccountMultiCylinderLCRC* (рис. 2.30), которая также лишь незначительно отличается от обсуждавшейся ранее *AccountCylinderLCRC* (рис. 2.21), и уже известное условие (оператор 7) завершения цикла (операторы 5-7).

Блок операторов 8, выполняет вывод искомых величин:

- Расчетную высоту  $h^c$  боковых пятен контакта  $L^{cu}L^{cd}$  и  $R^{cu}R^{cd}$ .
- Координаты  $(x^{ld}, y^{ld})$  и  $(x^{rd}, y^{rd})$ ,  $(x^{lcd}, y^{lcd})$  и  $(x^{rcd}, y^{rcd})$  точек  $L^d$  и  $R^d$ ,  $L^{cd}$  и  $R^{cd}$  нижнего  $L^dR^d$  и боковых  $L^{cu}L^{cd}$ ,  $R^{cu}R^{cd}$  пятен контакта.
- Координаты  $(x^{lc}, y^{lc})$  и  $(x^{rc}, y^{rc})$  крайних точек  $L^c$  и  $R^c$  сечения  $L^cR^c$ .
- Наборы постоянных интегрирования  $C_y^+$ ,  $\tilde{C}_y$ ,  $C_y^*$  и  $C_y^v$  для комплекта соотношений ((2.12)-(2.15)), выполняющихся вдоль следующих линий: а)  $L^cR^c$  — центрального сечения модельного тела; б)  $L^{cd}R^{cd}$  — соединяющей нижние точки боковых пятен контакта; в)  $L^dR^d$  — принадлежащей нижнему пятну контакта.

- Постоянные интегрирования  $C_x^+$ ,  $\tilde{C}_x$ ,  $C_x^*$  и  $C^v$  для комплекта соотношений ((2.16)-(2.21)), выполняющихся вдоль вертикальных прямых, содержащих отрезки  $L^c L^{1*}$ ,  $R^c R^{1*}$  (рис. 2.28).
- Параметры напряженного состояния, т.е. полуинтервал  $\Delta_\varphi$  изменения угла  $\varphi$ , собственно значение угла  $\varphi$ , а также полусуммы  $s$  главных нормальных напряжений, относящиеся к точкам: а)  $L^c$ ,  $R^c$  центрального сечения плода томата ( $\Delta_{\varphi^c}$ ,  $\varphi^{lc}$ ,  $\varphi^{rc}$ ,  $s^{lc}$ ,  $s^{rc}$ ); б)  $L^c$ ,  $R^c$  боковых пятен контакта ( $\Delta_{\varphi^{cd}}$ ,  $\varphi^{lcd}$ ,  $\varphi^{rcd}$ ,  $s^{lcd}$ ,  $s^{rcd}$ ); в)  $L^d$ ,  $R^d$  нижнего пятна контакта ( $\Delta_{\varphi^d}$ ,  $\varphi^{ld}$ ,  $\varphi^{rd}$ ,  $s^{ld}$ ,  $s^{rd}$ ).

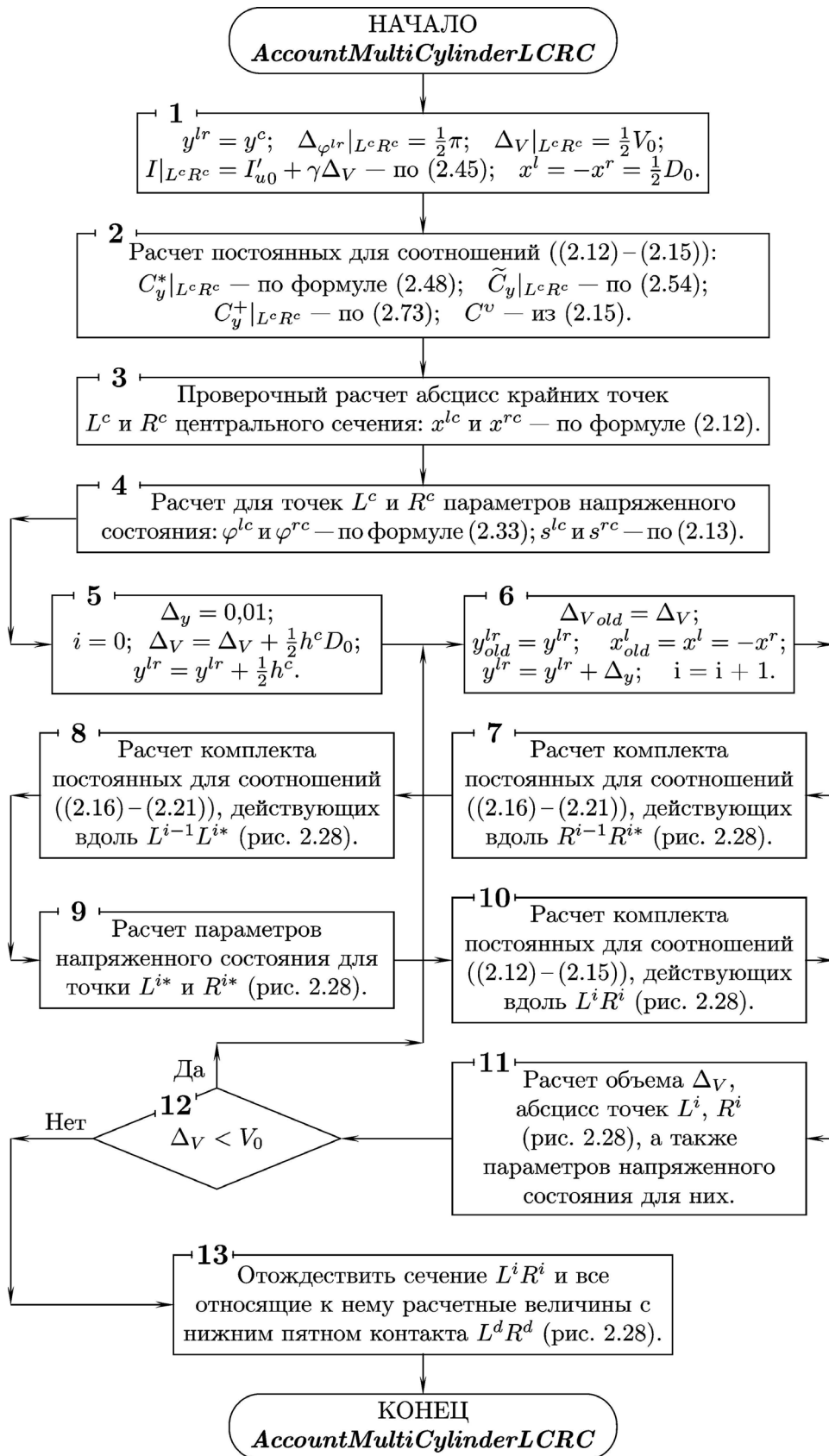
На самом деле в реальный алгоритм основной программы (рис. 2.29) входят еще ряд операторов, которые выполняют построение бокового контура плода томата. Сами графики мы дальше приведем и обсудим, а относящиеся к их построению операторы ни приводить, ни обсуждать не будем. Этот частный вопрос не является принципиально важным и, к тому же, имеет много вариантов реализации.

Перейдем к алгоритму (рис. 2.30) подпрограммы *AccountMultiCylinderLCRC*. От алгоритма применявшейся ранее подпрограммы *AccountCylinderLCRC* (рис. 2.21) текущий отличается только блоком операторов 5. Раньше (рис. 2.14В) точки  $L^0$  и  $R^0$  совпадали с соответствующими точками  $L^c$  и  $R^c$  центрального сечения, и первый элементарный прирост ординаты  $y^{lr}$  (блок операторов б) сразу же приводил к выходу на криволинейную часть свободного контура модельного тела. Теперь (рис. 2.21) понадобился проход вдоль прямолинейных участков боковых пятен контакта  $L^{cu} L^{cd}$ ,  $R^{cu} R^{cd}$ , вплоть до точек  $L^{cd}$  и  $R^{cd}$ . Это влечет за собой прирост ординаты

$$y^{lr} \Big|_{L^{cd} R^{cd}} = y^{lr} \Big|_{L^c R^c} + \frac{1}{2} h^c \quad (2.86)$$

и прирост располагающегося над сечением  $L^{cd} R^{cd}$  объема модельного тела

$$\Delta_V \Big|_{L^{cd} R^{cd}} = \Delta_V \Big|_{L^c R^c} + \frac{1}{2} h^c D_0. \quad (2.87)$$

Рис. 2.30 Алгоритм подпрограммы *AccountMultiCylinderLCRC*

Вдоль отрезков  $L^c L^{cd}$  и  $R^c R^{cd}$ , равно как и вдоль их продолжений — отрезков  $L^{cd} L^{1*}$  и  $R^{cd} R^{1*}$ , выполняются соотношения ((2.16) - (2.21)) с одними и теми же наборами постоянных  $C_x^+$ ,  $\tilde{C}_x$ ,  $C_x^*$  и  $C^v$  (один набор для левой границы —  $L^c L^*$ , второй для правой —  $R^c R^{1*}$ ) это обстоятельство позволяет сохранить неизменным оставшуюся часть алгоритма *AccountCylinderLCRC* (рис. 2.21) и перенести ее в *AccountMultiCylinderLCRC* (рис. 2.30).

Исходные данные, при которых считалась программа в соответствии с рис. 2.29 и 2.30 приведены в табл. 2.3. В этой таблице ряд начальных величин имеет несколько значений. Реально все они перебирались в цикле, но, опять-таки для упрощения, эти непринципиальные особенности разбираемых алгоритмов исключены из рассмотрения и на рисунках не показаны.

Таблица 2.3.

Начальные данные для расчета формы свободного контура плода томата, взаимодействующего с жестким плоским деформатором и окружающими его другими плодами

| Наименование параметра   | Единица измерения | Условное обозначение | Номинальное значение  |
|--|-------------------|----------------------|---|
| 1  | 2                 | 3                    | 4   |
| <i>Геометрические параметры плода томата:</i>  |                   |                      |   |
| 1. Начальный (до приложения нагрузки) диаметр плода в его центральном горизонтальном сечении   | мм                | $D_0$                | 57,0  |
| 2. Конечный (после приложения нагрузки) диаметр плода в его центральном горизонтальном сечении | мм                | $D$                  | 57,0  |
| 3. Начальное значение половины высоты боковых пятен контакта                                   | мм                | $\frac{1}{2}h_0^c$   | 1,58220; 9,87224; 0,43162;<br>3,00102; 4,97812; 6,68322;<br><b>8,24360</b> ; 0,24314; 1,76462;<br>2,96998; 3,99959; 4,94910;<br>0,17123; 1,28070; 2,18102;<br>2,94507; 3,65495; |
| <i>Физико-механические свойства среды, составляющей плод томата:</i>                           |                   |                      |   |
| 4. Удельный вес  | Н/мм <sup>3</sup> | $\gamma$             | $0,9 \times 10^{-5}$  |
| 5. Заданные значения пластической постоянной   | Н/мм <sup>2</sup> | $k$                  | 0,01; <b>0,05</b> ; 0,10; 0,15  |

| 1  | 2  | 3            | 4                                  |
|--|----|--------------|------------------------------------|
| <i>Физико-механические параметры, области взаимодействия деформатора с плодом:</i> |    |              |                                    |
| 6. Коэффициент внешнего трения, действующего в области пятна контакта              |    | $f$          | 0,51                               |
| <i>Интенсивность внешнего воздействия:</i>   |    |              |                                    |
| 7. Интегральное значение внешней нагрузки  | Н  | $I_{u0}$     | 1,0; 20,0; 40,0; 60,0; <b>80,0</b> |
| <i>Позиционирование системы координат Oxy по высоте:</i>                           |    |              |                                    |
| 8. Координаты центральной точки вертикального сечения модельного тела              | мм | $(x^c, y^c)$ | (0,0)                              |

Промежуточные результаты расчетов (табл. 2.4), а также параметры напряженного состояния и формы свободного контура плода томата (табл. 2.5) относятся к исходным данным, которые в табл. 2.3 выделены жирным шрифтом. Остальные применялись при построении графиков рис. 2.31.

Таблица 2.4

Промежуточные цифровые данные расчета формы свободного контура плода томата (рис. 2.27, 2.28), взаимодействующего с жестким плоским деформатором и окружающими его другими плодами

| Наименование параметра и комментарий  | Единица измерения | Условное обозначение | Номинальное значение |
|---|-------------------|----------------------|----------------------|
| 1   | 2                 | 3                    | 4                    |
| <i>Общие расчетные данные:</i>  |                   |                      |                      |
| 1. Скорректированное интегральное значение начальной нагрузки   | Н                 | $I'_{u0}$            | 1,785266956          |
| 2. Объем единичного отрезка цилиндрического модельного тела   | мм <sup>3</sup>   | $V_0$                | 2551,758632          |
| 3. Общая постоянная (масштабирующий множитель [81,82,87])   | —                 | $C^v$                | 167,5253805          |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.12) -(2.15)), выполняющихся на <math>L^c R^c</math>:</i> |                   |                      |                      |
| 4.  | мм                | $C_y^*$              | 0,0                  |
| 5.  | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_y$        | 1,046560647          |
| 6.  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_y^+$              | 1,593331493          |

| 1  | 2                 | 3             | 4              |
|--|-------------------|---------------|----------------|
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.16) -(2.21)), выполняющихся на <math>L^c L^*</math> :</i>       |                   |               |                |
| 7.   | мм                | $C_x^*$       | 8,243617148    |
| 8.   | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_x$ | -0,01847807255 |
| 9.   | Н/мм <sup>2</sup> | $C_x^+$       | -0,09614952485 |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.16)- (2.21)), выполняющихся на <math>R^c R^*</math> :</i>       |                   |               |                |
| 10.  | мм                | $C_x^*$       | 8,243617148    |
| 11.  | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_x$ | -0,5653231103  |
| 12.  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_x^+$       | -0,0184780722  |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.12) -(2.15)), выполняющихся на <math>L^{cd} R^{cd}</math> :</i> |                   |               |                |
| 13.  | мм                | $C_y^*$       | 0,0            |
| 14.  | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_y$ | 0,460380607    |
| 15.  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_y^+$       | 1,00707726     |
| <i>Постоянные интегрирования для соотношений ((2.12)- (2.15)), выполняющихся на <math>L^d R^d</math> :</i>       |                   |               |                |
| 16.  | мм                | $C_y^*$       | 0,0            |
| 17.  | Н/мм <sup>2</sup> | $\tilde{C}_y$ | -0,5045174373  |
| 18.  | Н/мм <sup>2</sup> | $C_y^+$       | 0,0421792155   |

Таблица 2.5.

Параметры напряженного состояния и формы свободного контура плода томата (рис. 2.27, 2.28), взаимодействующего с жестким плоским деформатором и окружающими его другими плодами

| Наименование параметра и комментарий   | Единица измерения | Условное обозначение | Номинальное значение |
|--|-------------------|----------------------|----------------------|
| 1  | 2                 | 3                    | 4                    |
| <i>Геометрические параметры свободного контура нагруженного модельного тела:</i>         |                   |                      |                      |
| 1. Абсциссы точек (рис. 2.28): $L^c$ ;   | мм                | $x^{lc}$             | 28,50000002          |
| 2. $R^c$ ;   | мм                | $x^{rc}$             | -28,49999992         |
| 3. $L^d$ ;   | мм                | $x^{ld}$             | 16,75457253          |
| 4. $R^d$ .   | мм                | $x^{rd}$             | -16,75457253         |
| 5. Ордината ( $\frac{1}{2}h^c$ ) нижних точек $L^{cd}$ и $R^{cd}$ боковых пятен контакта | мм                | $y^{lcd} = y^{rcd}$  | 8,24462              |

| 1   | 2                 | 3                       | 4              |
|---|-------------------|-------------------------|----------------|
| 6. Ордината нижнего пятна контакта $L^d R^d$            | мм                | $y^{ld} = y^{rd}$       | 23,82362       |
| 7. Диаметр нижнего пятна контакта                       | мм                | $x^{ld} - y^{rd}$       | 33,50914506    |
| <i>Параметры напряженного состояния:</i>                |                   |                         |                |
| 8. Угловой параметр для сечений: $L^c R^c$              | рад.              | $\Delta_{\varphi^c}$    | 1,570796227    |
| 9. $L^{cd} R^{cd}$ ;                                    | рад.              | $\Delta_{\varphi^{cd}}$ | 1,570761165    |
| 10. $L^d R^d$   | рад.              | $\Delta_{\varphi^d}$    | 0,8223250069   |
| 11. Полусумма главных напряжений $s$ для точек: $L^c$ ; | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{lc}$                | -0,01847807252 |
| 12. $R^c$ ;   | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{rc}$                | -0,01847807218 |
| 13. $L^{cd}$ ;  | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{lcd}$               | -0,01847806358 |
| 14. $R^{cd}$ ;  | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{rcd}$               | -0,01847806324 |
| 15. $L^d$ ;   | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{ld}$                | 0,003689327397 |
| 16. $R^d$ .   | Н/мм <sup>2</sup> | $s^{rld}$               | 0,003689327397 |

Не трудно видеть, насколько реалистичными оказались результаты. Особенно наглядны графики (рис. 2.31), иллюстрирующие геометрическую форму четверти бокового контура поперечного сечения модельного тела (плода томата). Соответственно росту номера кривых 1, 2, 3, 4 и 5, возрастают и величина внешней нагрузки  $I_{u0}$ . Совершенно логично, что плод томата деформируется тем сильнее, чем интенсивнее силовое воздействие. Столь логично и влияние величины пластической постоянной  $k$  (рисунки А, В, С и D). Чем больше пластическая постоянная, т.е. чем жестче материал, составляющий плод, тем меньше он сплющивается. Этому соответствует переход от рисунка А к рисунку В и т.д.. Пропорционально росту внешнего воздействия и обратно пропорционально росту величины пластической постоянной изменяется величина высоты  $h^c$  боковых пятен контакта. В качественном смысле, все это абсолютно точно вписывается в модель поведения реального объекта — плода томата в реальном процессе нагружения.

Далее сравним, чем отличается картина деформации модельных тел в случае одиночного нагружения (рис. 2.1, 2.26) от случая с боковой поддержкой (рис. 2.27, 2.32).

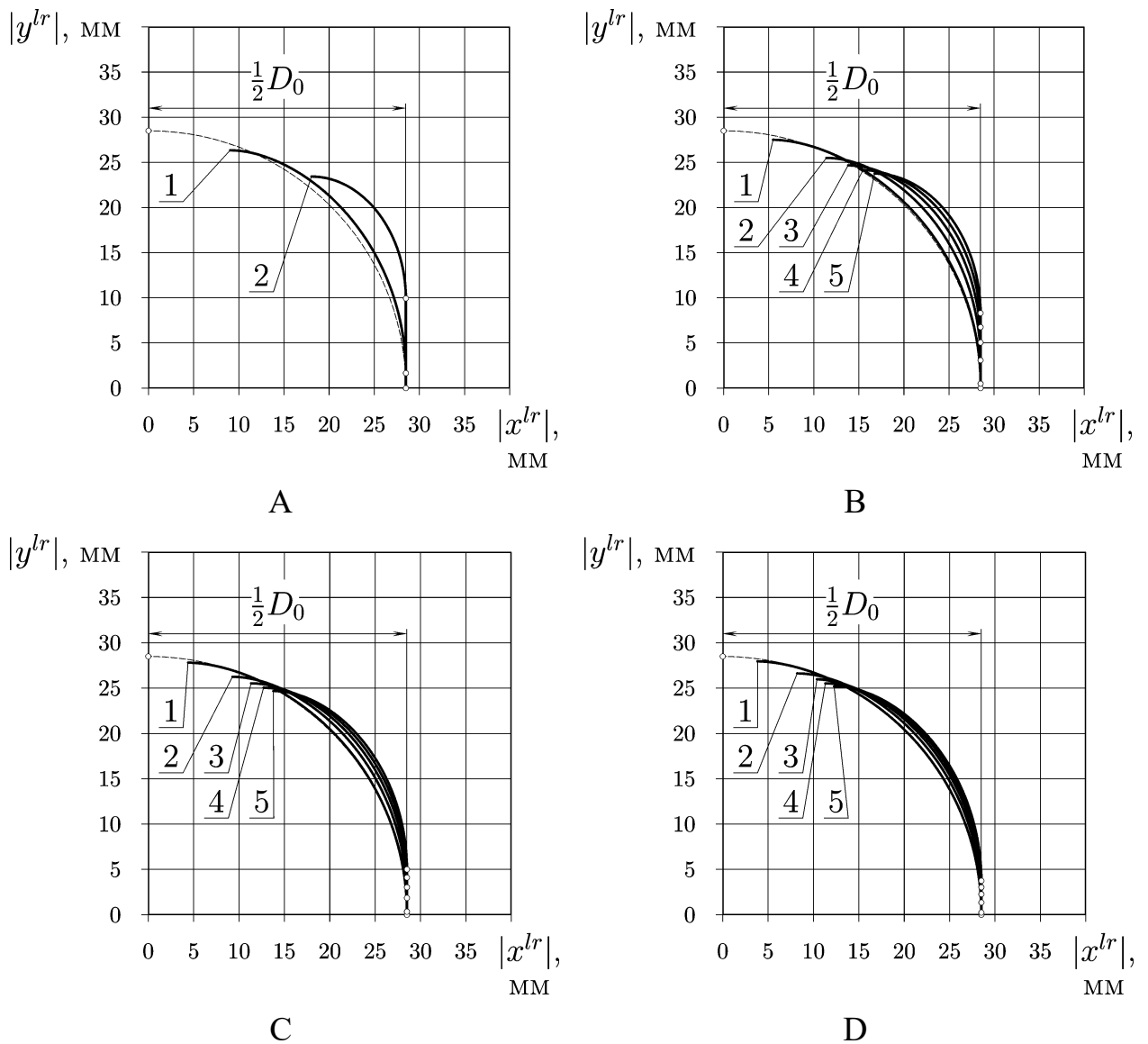


Рис. 2.31. Правая верхняя часть  $OR^u R^c$  контура поперечного сечения нагруженного модельного тела (рис. 2.27) до (тонкий пунктир) и после нагружения с различной интенсивностью (жирные сплошные линии: 1 —  $I_{u0} = 1,0$  кН; 2 —  $I_{u0} = 20,0$  кН; 3 —  $I_{u0} = 40,0$  кН; 4 —  $I_{u0} = 60,0$  кН; 5 —  $I_{u0} = 80,0$  кН) для случая, когда исходные данные соответствуют табл. 2.3, в которой пластическая постоянная  $k$  принимает ряд фиксированных значений: А) —  $k = 0,01$  Н/мм<sup>2</sup>; В) —  $k = 0,05$  Н/мм<sup>2</sup>; С) —  $k = 0,1$  Н/мм<sup>2</sup>; Д) —  $k = 0,15$  Н/мм<sup>2</sup>



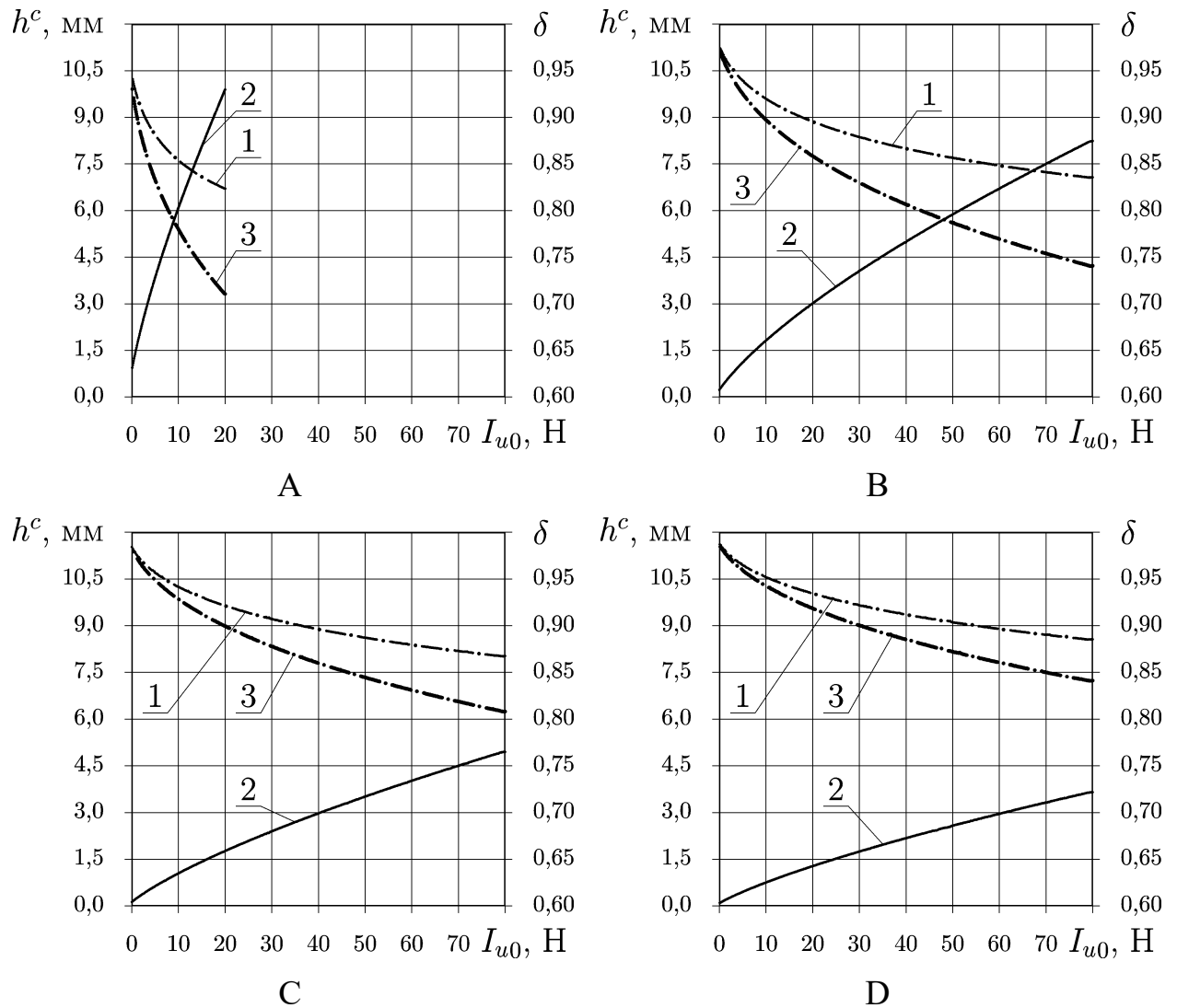


Рис. 2.32. Связь величин коэффициента деформации  $\delta$  (1 и 3) и высоты боковых пятен контакта  $h^c$  (2) с величиной  $I_{u0}$  внешнего воздействия на модельное тело (графики 1 и 2 соответствуют случаю с боковой поддержкой (рис. 2.27, табл.2.5), а график 3 — случаю нагружения одиночного плода (рис. 2.1, табл.2.3)), когда пластическая постоянная  $k$  принимает ряд фиксированных значений: А) —  $k = 0,01$  Н/мм<sup>2</sup>; В) —  $k = 0,05$  Н/мм<sup>2</sup>; С) —  $k = 0,1$  Н/мм<sup>2</sup>; D) —  $k = 0,15$  Н/мм<sup>2</sup>

Ключевыми на этих рисунках являются графики 3 (рис. 2.26) и 1 (рис. 2.32), иллюстрирующие зависимость величины деформации  $\delta$  от величины  $I_{u0}$  внешнего силового воздействия. Для удобства сравнения кривая 3 (рис. 2.26) под тем же номером перенесена на рис. 2.32. Как видим, в случае наличия боковой поддержки плоды томатов деформируются в существенно меньшей степени — кривая 1 располагается полностью над кривой 3. В процессе конструирования тары для хранения и транспортирования плодов томатов описанное обстоятельство необходимо учесть и за счет этого добиться повышения сохранности плодов.

## ВЫВОДЫ

1. Реальное напряженное состояние плода томата, находящегося в состоянии сжатия между двумя горизонтальными пластинами, элементами тары или соседними плодами является трехмерным.

2. Предложенная двумерная (плоская) модель пластичности в совокупности с применением модельного тела в виде единичного отрезка горизонтального бесконечно длинного кругового цилиндра в должной мере адекватно отражает напряженное состояние плодов томатов находящихся во взаимодействии друг с другом и фрагментами тары.

3. Коэффициент деформации плодов томатов по сравнению с воздействующей на них нагрузкой более точно отражает степень механического воздействия на них и может использоваться в качестве критерия разрушения.

4. Одиночный плод томата, находящийся в состоянии сжатия между двумя горизонтальными пластинами деформируется существенно больше, чем группа изначально контактирующих друг с другом плодов сжатых между такими же пластинами и при таких же удельных нагрузках.

5. Что бы при транспортировании плоды томатов повреждались в меньшей степени, конструкция тары должна обеспечивать боковую поддержку для каждого из плодов.

6. В качестве боковой поддержки плодов могут использоваться соседние такие же плоды. Желательно только, что бы сила их сжатия по горизонтали менялась пропорционально изменению вертикальных нагрузок, которые возникают в процессе транспортирования и являются динамическими.

7. Впервые полученные выражения интеграла внешней нагрузки и нагрузки действующей в произвольном горизонтальном сечении модельного тела, а также предложенный порядок расчета напряженного состояния и формы нагруженного модельного тела могут использоваться в дальнейшем при оценке эффективности предлагаемых конструкций тары.

Основные научные результаты раздела опубликованы в следующих работах: [73, 74, 75, 76,77].

### РАЗДЕЛ 3

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И КОНСТРУКЦИИ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТОМАТОВ

Из анализа опубликованных материалов (раздел 1) следует, что томаты являются одним из массовых видов плодоовощной продукции и их свойства предъявляют жесткие требования к создаваемой транспортной таре. К основным требованиям относятся следующие:

- обеспечение эффективной механизации погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ;
- обеспечение лучшей сохранности перевозимых овощей;
- удобство использования в качестве транспортного, уборочного и торгового оборудования;
- достижение высоких технико-эксплуатационных показателей, прежде всего, таких как собственная масса, коэффициент использования грузоподъемности транспортных средств.

Выполнение перечисленных требований легче всего обеспечить используя контейнерную тару. При этом контейнер должен иметь обоснованную грузоподъемность (габариты и количество секций) и такую конструкцию, которая обеспечит удобство работы с ним и минимальные механические воздействия на плоды в процессе перевозок и хранения.

#### 3.1. Обоснование габаритных размеров, общей грузоподъемности контейнера, количества и размеров секций в нем

3.1.1. Габариты контейнера в горизонтальном сечении. Основными аргументами для выбора горизонтальных габаритных размеров контейнера было соответствие единой международной системе размеров, основанной на номинальных размерах грузовых единиц и в частности международному модулю с размерами в плане 1200x800 [18], а также отечественным

отраслевым стандартам, в частности ГОСТ 21140–88 и модулю с горизонтальными размерами 400x600 [93]. Тут понятие «соответствие» мы понимаем, как «кратность размеров», т.е. предлагаемый контейнер может быть больше или меньше перечисленных в целое число раз.

В конечном итоге, с учетом приведенных выше аргументов, было принято, что предлагаемый контейнер должен иметь размеры в плане 800x600мм. Данный размер обеспечивает: во-первых, удобство работы с контейнером, как на поле, так и в теплицах и небольших торговых залах; во-вторых, при транспортировании обеспечивает заполняемость площади кузова современных транспортных средств с коэффициентом не ниже 0,8.

3.1.2. Статические нагрузки, как фактор для определения глубины секции контейнера и высоты слоя томатов в ней. Давление верхних плодов в слое представляет собой статически сжимающую нагрузку для плодов, которые размещены в нижнем слое. Статическая сжимающая нагрузка, приходящаяся на отдельный плод в слое, зависит от высоты слоя плодов, плотности их укладки и имеет вероятностный характер [18, 94].

По данным некоторых исследователей, на величину статической нагрузки оказывают влияние размеры плодов и трение их о стенки контейнера [18, 94, 95, 96]. Последний фактор тем значительнее, чем меньше горизонтальные габаритные размеры секции контейнера.

Для ориентировочной оценки величину статической сжимающей нагрузки действующей на плоды  $P_C$  можно считать изменяющейся по линейному закону в зависимости от высоты слоя  $h$  (в м) и плотности укладки  $\rho$  (в кг/м<sup>3</sup>):  $P_C = f(\rho, h)$ . Но известны более точные зависимости, которые были получены путем тензометрических исследований нагрузок на плоды, расположенные на дне контейнера размером в плане 800x600 мм [18, 94]. При этом плотность укладки плодов составляла 585 и 600 кг/м<sup>3</sup> соответственно для томатов открытого и закрытого грунта.

Измерения нагрузок производились при помощи месдозы, выполненной из оргстекла в виде круглой пластины диаметром 70 мм и толщиной 3 мм, закрепленной по контуру на металлическом корпусе. К пластине на обращенной внутрь корпуса поверхности прикреплены и соединены по схеме полумоста два проволочных тензодатчика.

Месдоза с зафиксированным в центре пластины образцом помещалась на дно контейнера. Регистрация действующих на образец нагрузок при изменении высоты слоя осуществлялась по шкале тензоусилителя ТА-5 на основании предварительной тарировки датчиков.

Установлено, что полученные таким путем данные по величине нагрузки, действующей на отдельные плоды в слое, хорошо аппроксимирует следующее выражение [18 ]:

$$P_c = C\rho gh^{1-\nu} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.1)$$

где:  $\rho$  — плотность укладки плодов томатов, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  — высота слоя плодов, м;  $\nu$  — безразмерный коэффициент бокового давления;  $C = 1$  — коэффициент согласования единиц измерения, м <sup>$\nu$</sup> ;  $d$  — диаметр плода, м.

Появление коэффициента бокового давления  $\nu$  обусловлено эффектом защемления плодов между собой и боковыми стенками тары. Каждый плод, внедряясь под действием силы тяжести в пространство между окружающими его такими же плодами, подобно клину передает нагрузку как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Поэтому часть вертикальной нагрузки перераспределяется на стенки контейнера. Этот механизм, во-первых, проявляется тем сильнее, чем ближе соседние стенки тары, т.е. чем меньше горизонтальные размеры последней; во-вторых, поясняет появление нелинейности (рис. 3.1) в выражении (3.1). В процессе исследований установлено, что для большинства типоразмеров современной тары, применяющейся при перевозках плодов томатов, величина коэффициента бокового давления лежит в интервале от 0,12 до 0,15 [18, 94].

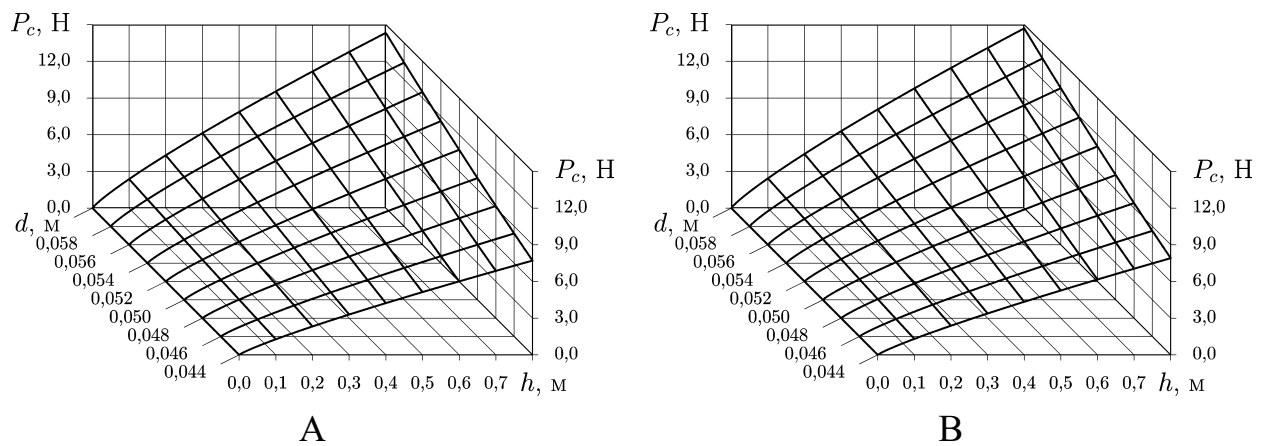


Рис. 3.1. Зависимость давления  $P_c$ , которое воспринимается отдельным плодом, находящимся в слое, от высоты  $h$  слоя плодов: А — томаты открытого грунта; В — томаты закрытого грунта.

Описанные выше процессы и закономерности хорошо согласуются с данными других исследователей [18, 95, 96].

Практический смысл зависимости (3.1) позволяет ее использовать для установления допустимых размеров секции контейнера по высоте или толщине слоя томатов в ней. Открытым остается только следующий вопрос: какую нагрузку  $P_d$  на плод следует считать допустимой.

3.1.3 Максимальная допустимая статическая нагрузка на плоды. Из авторских экспериментов [68, 94, 97, 98] следует, что когда нагрузка, действующая на отдельный плод, достигает разрушающей величины  $P_p$  (табл. 3.1), плод соответственно трескается.

Таблица 3.1

Экспериментальные значения статической разрушающей нагрузки для плодов томатов открытого и закрытого грунта в случае, если сжатие осуществляется между жесткими и эластичными поверхностями

| Плоды томатов    | Поверхность контакта | Среднее значение $\bar{P}_p$ разрушающей нагрузки $P_p$ , Н |
|------------------|----------------------|---|
| Открытого грунта | жесткая              | 41,3  |
|                  | эластичная           | 49,6  |
| Закрытого грунта | жесткая              | 51,6  |
|                  | эластичная           | 62,7  |

Очевидно, что использовать среднее значение  $\bar{P}_p$  разрушающей нагрузки  $P_p$  в качестве допустимой статической нагрузки  $P_d$  при расчетах высоты секции контейнера  $h_{СК}$  не представляется возможным, поскольку в таком случае значительная часть томатов в контейнере будут гарантированно поврежденными даже без транспортирования. Причина следующая: в процессе транспортирования и хранения томатов крайне нежелательно допускать даже остаточные деформации плодов за пределами упругости. Экспериментами установлено, что предел упругости для плодов томатов открытого и закрытого грунта составляет 28...36% от  $\bar{P}_p$ . Если в процессе механического воздействия на плоды предел упругости пройден, то на поверхности томатов остаются вмятины, что по понятным причинам не является желательным и является снижением качества перевозимой продукции.

С учетом изложенного выше введем безразмерный коэффициент предела упругости  $\eta_{ПУ}$ , который по величине должен попадать в интервал значений от 0,28 до 0,36. Таким образом, допустимую статическую нагрузку можно определить так

$$P_d = \eta_{ПУ} \bar{P}_p. \quad (3.2)$$

3.1.4 Вибрационные воздействия на плоды при транспортировке. Динамические нагрузки на плоды возникают при движении транспортного средства по дорожным неровностям. Эти неровности и вызываемые ими колебания транспортных средств описываются нерегулярными функциями. Функции неровностей дорожного профиля относятся к категории случайных стационарных функций, характеристики которых подчиняются нормальному распределению статических показателей [99].

Величина динамического воздействия на транспортируемый груз овощей и плодов зависит от амплитудного спектра неровностей дороги, скорости прохождения неровностей транспортным средством и передаточной функции воздействий от неровностей дороги к слою плодов.



Обозначим  $A = A(\Omega)$  амплитуда колебаний дорожного покрытия, рассматриваемая, как функция частоты  $\Omega$  этих колебаний. Поскольку колебания с амплитудой  $A(\Omega)$  передаются на систему „транспортное средство – слой плодов” извне, то их следует понимать, как возмущающие. Сама система „транспортное средство – слой плодов” характеризуется собственной частотой колебаний  $\omega$ . Результирующее колебание слоя плодов будет зависеть, как от  $A(\Omega)$ , так и от собственной частоты  $\omega$  и определяется формулой

$$B(\Omega, \omega) = H(\Omega, \omega)A(\Omega), \quad (3.3)$$

где:  $B(\Omega, \omega)$  — амплитуда результирующих колебаний;  $H(\Omega, \omega)$  — передаточная функция или коэффициент динамичности системы [97]. Тут обе величины  $B$  и  $H$  следует понимать как функции возмущающей  $\Omega$  и собственной  $\omega$  частот колебаний.

Определение величины собственной частоты  $\omega$  системы „транспортное средство – слой плодов” выполним позже.

Возмущающую частоту  $\Omega$  определим по формуле

$$\Omega = \nu f, \quad (3.4)$$

где:  $\nu$  — скорости движения транспортного средства, в м/с;  $f$  — частота чередований неровностей (в  $\text{м}^{-1}$ ), которую следует понимать как количество пиков неровностей, приходящихся на каждый метр пути движения. В таком случае  $f^{-1}$  — длина волны неровностей.

Понятно, что величиной  $f$  на этапе проектирования тары для томатов управлять нельзя вовсе, поскольку она полностью зависит от качества и состояния дорожного покрытия. Величиной  $\nu$  скорости движения транспортного средства управлять также невозможно, хотя и можно оговорить ее максимально допустимый предел  $\nu_{\max}$ . Но в таком случае произведение  $(\nu f)$  по прежнему останется не управляемым, равно, как, и зависящие от него, частота  $\Omega$  и амплитуда  $A(\Omega)$  возмущающих колебаний.

Таким образом, что бы понять, какими будут результирующие колебания  $B(\Omega, \omega)$  (3.3) следует изучить передаточную функцию  $H(\Omega, \omega)$ . Опреде-

лить ее можно и с (3.3) [97]

$$H(\Omega, \omega) = \frac{B(\Omega, \omega)}{A(\Omega)}, \quad (3.5)$$

но более информативной является ее следующая форма [100, 101, 102]:

$$H(\Omega, \omega) = \left[ \left( 1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2} \right)^2 + \gamma^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.6)$$

где:  $\gamma$  — безразмерный показатель демпфирования колебаний

Из (3.6) вытекает, что передаточная функция  $H(\Omega, \omega)$  зависит от величины отношения частот  $\Omega/\omega$  вынужденных и собственных колебаний и показателя демпфирования колебаний  $\gamma$ , который полностью определяется конструктивными особенностями и состоянием системы „транспортное средство – слой плодов”. Иллюстрирует эту зависимость рис. 3.2.

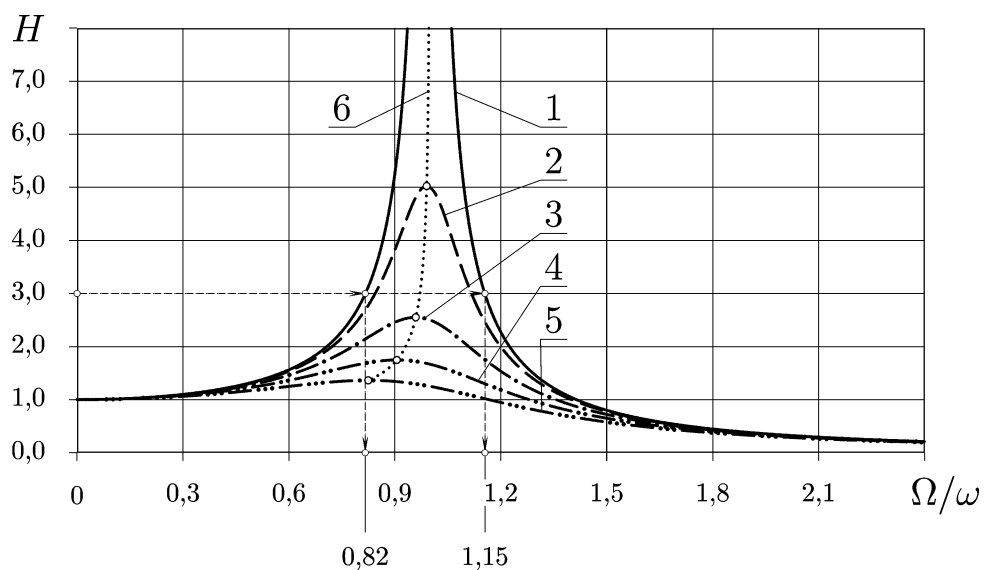


Рис. 3.2. Зависимость передаточной функции  $H = H(\Omega/\omega, \gamma)$  исследуемой системы (линии 1 – 5) от величины отношения  $\Omega/\omega$  частот вынужденных к собственным и показателя демпфирования колебаний  $\gamma$ , который принимает значения: 0 (1); 0,2 (2); 0,4 (3); 0,6 (4); 0,8 (5). Линия 6 является линией максимумов функциональной связи  $H = H(\Omega/\omega, \gamma)$ .

Таким образом, из совокупности выражений ((3.3) – (3.6)), рис. 3.2 и относящихся к ним пояснений следует, что для влияния на результирующие колебания  $B(\Omega, \omega)$  у конструктора тары есть только один путь это управле-

ние коэффициентом демпфирования колебаний  $\gamma$ . Чем больше  $\gamma$ , тем меньше  $H(\Omega, \omega)$  и, как следствие, тем меньше амплитуда результирующих колебаний  $B(\Omega, \omega)$ . Этот тезис справедлив для любого соотношения частот  $\Omega/\omega$ .

Если возмущающим входным воздействием является случайный стационарный процесс, описывающий нерегулярные неровности дорожного профиля и представляющий сумму бесконечно большого числа колебаний различной частоты (гармоник)

$$A(\Omega) = A_1 \sin(\Omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\Omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\Omega t + \varphi_3) + \dots, \quad (3.7)$$

где:  $A_i$  и  $\varphi_i$  — амплитуда и начальная фаза  $i$ -той гармоники ( $i = 1, 2, 3, \dots, \infty$ );  $t$  — время, то и на выходе системы имеет место случайный аналогичный колебательный процесс, соотношение амплитуд которого с возмущающими амплитудами равно передаточной функции. Этот тезис непосредственно следует из выражений (3.3), (3.7) и весьма важен, поскольку в реальности колебания редко бывают моночастотными.

По исследованию результирующих колебаний груза (в данном случае плодов томатов) имеется много известных работ.

В частности, исследования повреждаемости плодов при перевозке в ящичных поддонах внутренней высотой 600 мм навалом показали, что повреждения плодов происходят, в первую очередь, в верхних слоях и зависят от величины ускорения [103]. Когда ускорение в верхних слоях достигает значений около  $1,0g$ , обусловленные ими силы периодически вызывают состояние невесомости плодов. В результате плоды вращаются и бьются друг о друга. При уменьшении ускорения в верхних слоях до  $0,67g$  это явление прекращается, и плоды повреждаются значительно меньше.

Известны работы [104, 105] из которых следует, что входные ускорения, действующие у основания кузова автомобиля увеличиваются в 4 раза в верхней части контейнера слоя плодов.

Поскольку ускорение определяется как первая производная от амплитуды  $A$  (3.7) по времени  $t$ , а передаточная функция  $H$  (3.6) от времени не

зависит, то, принимая во внимание выражения (3.3) и (3.7), заключаем, что результирующие ускорения можно ограничить все тем же путем, через увеличение демпфирования колебаний  $\gamma$  и уменьшение величины  $H(\Omega, \omega)$ .

Разумеется, кузов автомобиля, а, значит, контейнеры и томаты в них, совершают не только вертикальные колебания. Как показали исследования плавности хода поддрессоренных и неподдрессоренных транспортных средств, вертикальные ускорения колебаний в полтора раза превышают горизонтальные [106]. Поскольку инерционные силы пропорциональны ускорениям, то можно утверждать, что для разрушения плодов при транспортировании критическими являются именно вертикальные нагрузки и колебания. Из этого следует вывод, что именно им и необходимо уделить наибольшее внимание, а если так, то в дальнейшем горизонтальные составляющие колебаний мы рассматривать не будем.

Описать параметры результирующих колебаний можно и несколько другим путем, хотя и менее строго. Так из работы [107] известно, что амплитуда вынужденных гармонических колебаний  $A_B$  равна:

$$A_B = A_C H(\Omega, \omega), \quad (3.8)$$

где  $A_C$  — перемещение при статическом приложении возмущающей силы. Принципиальная разница между выражениями (3.3) и (3.8) состоит в том, что в отличие от амплитуды  $A(\Omega)$  отклонение  $A_C$  определяется в статике, но на физическом смысле и аналитическом представлении передаточной функции  $H(\Omega, \omega)$  это никак не сказывается.

Преимущества такого «статического, менее строгого» подхода наиболее полно проявляется при определении сил воздействующих на плоды. В соответствии с работой [18, 102] динамические вибрационные нагрузки  $P_B$  на плоды, совершающие колебания, равны:

$$P_B = P_C H(\Omega, \omega), \quad (3.9)$$

где силу статического воздействия  $P_C$  можно определить выражением (3.1). Таким образом, величина действующей на плоды вибрационной нагрузки  $P_B$

зависит от приложенной к ним статической нагрузки  $P_C$ , то есть высоты слоя  $h$ , и передаточной функции  $H(\Omega, \omega)$  системы, совершающей колебания: — „платформа транспортного средства – контейнер с плодами”.

Из практики известно, что динамические нагрузки на плоды, возникающие при движении транспортного средства по дорожным неровностям, могут в  $n \in [1,7; 3,0]$  раза превышать действующие статические [62].

Последний тезис для случая, когда увеличение нагрузок  $n = 3,0$  отражен на рис. 3.2 в предположении, что система „транспортное средство – слой плодов” никакого демпфирующего воздействия не оказывает, т.е. когда  $\gamma = 0$ . Конкретные цифры можно получить, воспользовавшись выражением (3.6). Они позволяют сделать вывод, что если  $\gamma = 0$ , то частоты должны удовлетворять условию

$$\Omega \leq 0,82\omega \quad \text{или} \quad 1,15\omega \leq \Omega, \quad (3.10)$$

иначе условие

$$\frac{P_B}{P_C} \leq n \quad (3.11)$$

выполняться не будет.

С другой стороны достигнуть выполнения условия (3.11) можно, если конструкция транспортного средства и контейнеров, включая метод их установки и закрепления, а также размеры и физико-механические параметры плодов обеспечат следующее значение показателя демпфирования

$$\gamma = \frac{1}{n}. \quad (3.12)$$

В последнем случае, какими бы ни были частоты  $\Omega$  и  $\omega$  отношение  $P_B/P_C$  всегда будут удовлетворять условию (3.11). Из последнего выражения и работы [62] следует, что в практике перевозок плодоовощной продукции, достигнутая величина показателя демпфирования превышает  $1/3$ .

Далее обращаясь к выражениям (3.11) и (3.12) записываем

$$\frac{P_B}{P_C} \leq \frac{1}{\gamma} \quad (3.13)$$

или

$$P_{BM} = \frac{1}{\gamma} P_C, \quad (3.14)$$

где  $P_{BM}$  — максимальное значение  $P_B$ , которое достигается, если соотношение между частотами  $\Omega$  и  $\omega$  принимает самое неблагоприятное значение

$$\frac{\Omega}{\omega} = \sqrt{1 - \frac{\gamma^2}{2}}, \quad (3.15)$$

при котором передаточная функция  $H = H(\Omega/\omega)$  (3.6) достигает максимума.

Поскольку ранее уже говорилось, что частотные параметры  $\Omega$  и  $\omega$  не являются управляемыми, то расчет предельных динамических нагрузок  $P_{BM}$  удобно выполнять используя выражение (3.14) и полагая, что

$$\gamma = \frac{1}{3} \quad (3.16)$$

— гарантировано достижимая в практике перевозок величина.

**3.1.5 Определение собственных частот колебаний секции контейнера.** В предыдущем разделе было сказано, что в практике перевозок плодоовощной продукции, достигнутая величина показателя демпфирования превышает 1/3. И это в случае, когда тара не предусматривает собственных устройств демпфирования. Если же в конструкции контейнера их применить, то удастся еще больше снизить уровни динамических воздействий на транспортируемые плоды. Поскольку предлагаемый контейнер является многосекционным, то устройства демпфирования выгодно применять для каждой секции отдельно. В этой связи в дальнейшем будем рассматривать одну секцию.

При этом необходимо понимать, что контейнер и автомобиль следует понимать как систему (рис. 3.3), характеризующуюся рядом параметров. Важнейшими среди них являются:  $m_1$  и  $m_2$  — неподрессоренная и поддрессоренная массы автомобиля;  $m_3$  — масса секции контейнера с грузом (в кг);  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  — жесткость, шин, рессорной части подвески автомобиля и демпфирующих элементов контейнера (в  $10^3$  Н/м);  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  — коэффициенты

демпфирования шин, элементов подвески автомобиля и демпфирующих элементов секции контейнера (в  $10^3 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ ).

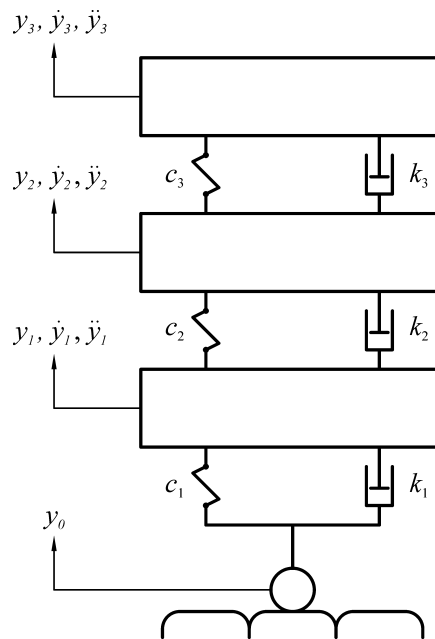


Рис. 3.3. Схема системы «автомобиль – секция контейнера»

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой системы имеют вид [97]:

$$\begin{cases} m_3 \ddot{y}_3 + k_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + c_3 (y_3 - y_2) = 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_3 (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + k_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_3 (y_2 - y_3) + c_2 (y_2 - y_1) = 0 \\ m_1 \ddot{y}_1 + k_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 \dot{y}_1 + c_2 (y_1 - y_2) + c_1 y_1 = k_1 \dot{y}_0 + c_1 y_0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (3.17) будет существенно проще, если положить, что  $k_1 = k_2 = k_3 = 0$ . Такой подход оправдан с нескольких позиций. Во-первых, в транспортировке контейнеров могут принимать участие автомобили различных классов и конструкций, а, значит, характеризующихся различными значениями параметров  $k_1$  и  $k_2$ . Во-вторых, вариант, при  $k_1 = k_2 = k_3 = 0$ , является существенно более жестким, что обеспечивает некий запас по демпфированию. В-третьих, в области низкочастотного резонанса величина собственной частоты  $\omega$  весьма слабо зависит от  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$ , а, напротив, практически полностью определяется величинами жест-

костей  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  [108]. Последний фактор является главным. С учетом оговоренных ограничений система (3.17) приводится к виду [85]:

$$\omega^6 + A_2\omega^4 + A_1\omega^2 + A_0 = 0, \quad (3.18)$$

где:

$$A_0 = -\frac{c_1 c_2 c_3}{m_1 m_2 m_3}, \quad (3.19)$$

$$A_1 = \frac{c_1 c_2}{m_1 m_2} + \frac{c_1 c_3}{m_1 m_2} + \frac{c_1 c_3}{m_1 m_3} + \frac{c_2 c_3}{m_1 m_2} + \frac{c_2 c_3}{m_1 m_3} + \frac{c_2 c_3}{m_2 m_3}, \quad (3.20)$$

$$A_2 = -\left( \frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} + \frac{c_3}{m_2} + \frac{c_3}{m_3} \right), \quad (3.21)$$

$\omega$  — частоты собственных колебаний системы «автомобиль – секция контейнера», которую предстоит вычислить.

Числовое значение жесткости шин  $c_1$  мало зависит от грузоподъемности автомобиля и лежит в интервале  $1920 - 3236 \times 10^3$  Н/м [109]. Обычно в качестве среднего значения принимают  $c_1 = 2000 \times 10^3$  Н/м [108], что соответствует автомобилю грузоподъемностью 3 тонны.

Жесткость  $c_2$  рессорной части подвески автомобиля укладывается в интервал от  $564$  до  $729 \times 10^3$  Н/м [108, 109], который охватывает автомобили грузоподъемностью от 3 до 5 тонн. Мы же будем ориентироваться на трехтонные автомобили. Это связано с тем, что производство плодоовощной продукции в мировом сельском хозяйстве чаще всего приходится на небольшие фермы, где доминируют автомобили средней грузоподъемности. В работе [108] для автомобилей средней грузоподъемности (подрессоренная масса  $m_2 = 3140$  кг) рекомендуется  $c_2 = 564 \times 10^3$  Н/м. При этом предполагается, что неподрессоренная масса  $m_1 = 590$  кг.

Поскольку конструкцию подвески секции контейнера нам только предстоит разработать, равно, как и обосновать ее грузоподъемность, то решение уравнения (3.18) относительно собственной частоты  $\omega$  будем выполнять для диапазона значений  $m_3 \in [65, 85]$ ,  $c_3 \in [150, 550]$ , которые гарантировано охватывают ожидаемые величины (рис. 3.4).



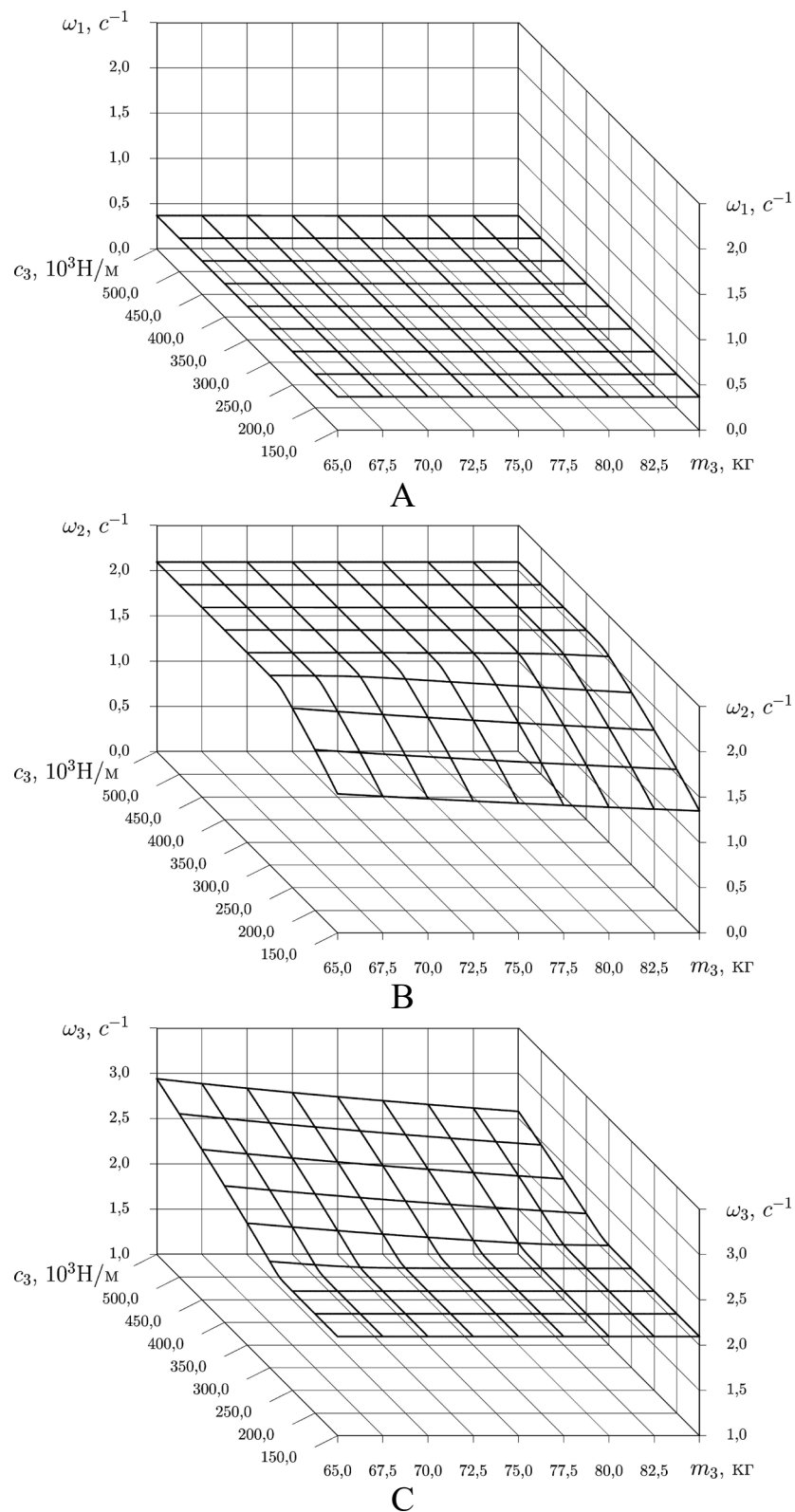


Рис. 3.4. Положительные корни  $\omega_1$  (А),  $\omega_2$  (В) и  $\omega_3$  (С) уравнения (3.18): неподдресоренная масса автомобиля  $m_1 = 590$  кг; поддресоренная масса автомобиля  $m_2 = 3140$  кг; масса секции контейнера с грузом  $m_3 \in [65, 85]$ ; жесткость шин  $c_1 = 2000 \times 10^3$  Н/м; жесткость рессорной части подвески автомобиля  $c_2 = 564 \times 10^3$  Н/м; жесткость демпфирующих элементов контейнера  $c_3 \in [150, 550] \times 10^3$  Н/м.

Из последнего рисунка видно, что три положительные (физически осмысленные) корни  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$  уравнения (3.18), являющие собою собственные частоты колебаний системы «автомобиль – секция контейнера» укладываются в интервал частот  $\omega_i \in [0,5; 3,0]$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

Колебания неподрессоренных масс, возникающих при движении транспортных средств по неровностям дороги, характеризуются частотами 6...14Гц [99] и зависят от давления в шинах, жесткости рессор и загрузки автомобиля. Эти колебания постоянно поддерживаются в результате пополнения энергией от толчков, вызываемых неровностями дороги, и поэтому могут рассматриваться как возбуждающие колебания  $\Omega$ .

Из последних двух абзацев можно сделать вывод, что в нашем случае условие (3.10) (рис. 3.2) гарантировано выполняется, а, значит, даже если в конструкции контейнера не предусмотреть демпфирования ( $k_3 = 0$ ) то фактические вертикальные нагрузки на плоды  $P_B$  не превысят статические  $P_C$  более чем в 3 раза. Другими словами, когда в конструкции контейнера имеется пружинная подвеска секций, то гасители колебаний устраивать совсем не обязательно, хотя и желательно. Ведь в этом случае  $k_3 > 0$ .

В отношении пружинной подвески секции контейнера можно сделать вывод, что она может быть реализована по разному, важно только что бы значения суммарной жесткости пружин подвески укладывались в исследованный выше диапазон  $c_3 \in [150, 550] \times 10^3$  Н/м.

3.1.6 Определение глубины секции контейнера. Поскольку, установлено, что динамические нагрузки на плоды могут в 1,7...3,0 раза превышать действующие статические [62], то введем  $\eta_d$  — коэффициент снижения предельного значения статической разрушающей нагрузки по причине динамических воздействий, который будет равным 1/1,7...1/3.

Теперь, введем обозначение:  $h_{СКМ}$  — максимально допустимая высота слоя томатов или секции контейнера. Далее, выполнив замену  $P_C = P_d$  и

$h = h_{СКМ}$  в выражении (3.1), а затем подстановку в полученное, развернутого представления  $P_D$  в соответствии с выражением (3.2), в конечном итоге из выражения (3.1) получаем уравнение

$$\eta_{ПВ}\eta_D\bar{P}_P = C\rho gh_{СКМ}^{1-\nu} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.22)$$

которое затем решаем относительно  $h_{СКМ}$ . В результате получаем конечное выражение для определения максимально допустимой высоты секции контейнера:

$$h_{СКМ} = \left( \frac{4\eta_{ПВ}\eta_D\bar{P}_P}{C\rho g\pi d^2} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}. \quad (3.23)$$

Подстановка в (3.23) конкретных значений  $\eta_D = 0,33$  и  $\eta_{ПВ} = 0,36$ ,  $\bar{P}_P = 49,6$  Н для томатов открытого грунта и  $62,7$  Н для томатов закрытого грунта,  $\rho = 585$  и  $600$  кг/м<sup>3</sup> соответственно для томатов открытого и закрытого грунта,  $d = 0,0528$  м дает максимальную высоту секции эластичной оболочки многоярусного контейнера  $h_{СКМ} = 0,47$  и  $0,58$  м. Учитывая, что отдельно создавать тару для плодов томатов открытого и закрытого грунта нецелесообразно, принимаем  $h_{СКМ} = 0,47$  м, ориентируясь на меньшее значение.

Далее с целью обеспечения повышенной сохранности плодов томатов вводим  $\eta_{ИБ}$  — коэффициент использования  $h_{СКМ}$ , т.е. максимально допустимой высоты секции контейнера. Величина  $\eta_{ИБ}$  лежит в пределах  $0,5 \dots 0,75$ , что соответствует общепринятым в технике нормам. Применив данный коэффициент, посредством расчетов по формуле

$$h_{СК} = h_{СКМ} \cdot \eta_{ИБ}, \quad (3.24)$$

при  $\eta_{ИБ} = 0,64$  мы получаем  $h_{СК} = 0,3$  м — искомое числовое значение высоты секции многоярусного контейнера предлагаемой конструкции.

3.1.7 Определение количества секций и общей грузоподъемности контейнера. Подводя итог рассмотренного в предыдущем параграфе,

скажем, что на основании предложенной выше методики и авторских экспериментальных данных, удалось обосновать габариты секции (800 x 600 x 300 мм) предлагаемого контейнера с эластичными оболочками, предназначенного для транспортирования и краткосрочного хранения плодов томатов. В таком случае грузоподъемность одной секции контейнера составит

$$m_{CK} = \rho abh_{CK} \in [84,24; 86,4] \approx 85,0 \text{ (в кг)} \quad (3.25)$$

где:  $a = 0,8$ ,  $b = 0,6$  и  $h_{CK} = 0,3$  — габаритные размеры секции контейнера (в м);  $\rho = 585$  и  $600$  — насыпная плотность плодов томатов открытого и закрытого грунта (в кг/м<sup>3</sup>).

Количество секций контейнера  $n_{CK}$ , располагающихся друг над другом можно определить исходя из удобства обслуживания и соотнося возможную общую высоту контейнера с ростом человека. При этом следует учитывать, что контейнер должен иметь колеса для перекачивания по ровной твердой поверхности пола магазина или склада, а сами секции должны располагаться с некоторым зазором. Из этих рассуждений вытекает, что их может быть не больше трех ( $n_{CK} = 3$ ). Далее находим общую грузоподъемность контейнера

$$m_{CK} = n_{CK} m_{CK} = 255,0 \text{ (в кг)}. \quad (3.26)$$

Тут следует заметить, что расчет грузоподъемности секции и контейнера в целом, выполненный по формулам (3.25) и (3.26) следует считать ориентировочным, по той причине, что в процессе расчетов горизонтальные размеры секции контейнера  $a$ , и  $b$  мы приняли равными габаритным. На самом деле эти величины будут уточнены после того, как будет разработан окончательный вариант конструкции.

## 3.2. Разработка конструкции контейнера

### 3.2.1. Устройство и принцип работы секции контейнера.

Во второй главе настоящей работы было показано, что в случае боковой поддержки плоды томатов могут выдерживать существенно большую нагрузку,

деформируясь при этом весьма незначительно, не достигая предела пластичности, т.е. такого состояния при котором появляются остаточные деформации. Таким образом, далее нам следует разработать такую конструкцию секции контейнера при которой для большинства плодов реализуется этот механизм. Разумеется устройство должно оставаться простым, надежным, дешевым и удобным в работе и обслуживании.

Для решения обозначенной задачи было предложена следующая конструкция (рис. 3.5). Оболочка секции контейнера 1, которая собственно и представляет собой полезный объем для размещения плодов томатов, выполнена из эластичного тканого материала. В недеформированном состоянии она имеет прямоугольную форму, с открытым верхом. В верхней части оболочка 1 подвешена к раме контейнера 4 на пружинных вертикальных растяжках 2. Нижние угловые точки оболочки 1 прикреплены к раме контейнера 4 на диагональных также пружинных растяжках 3. Т.е. не имея собственных элементов жесткости, оболочка 1 растянута внутри жесткой рамы контейнера.

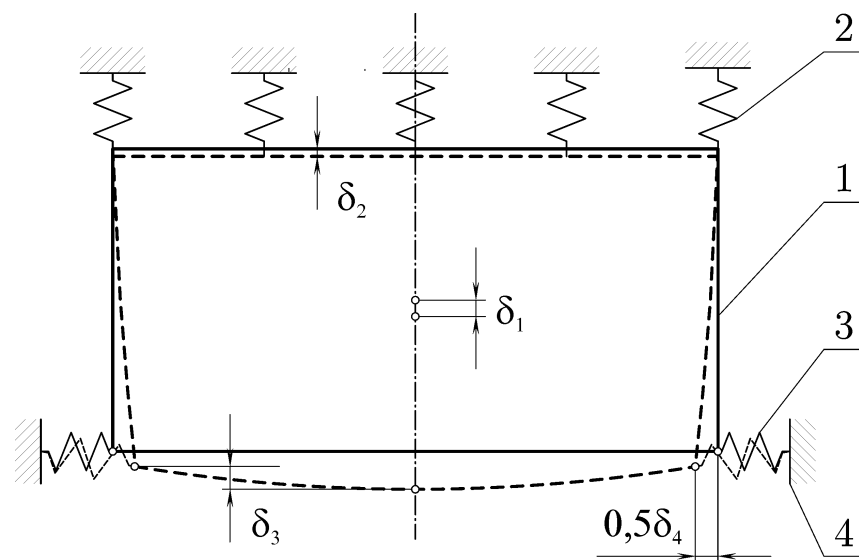


Рис.3.5. Схема виброизоляции эластичной оболочки многоярусного контейнера посредством амортизирующих растяжек: 1 — оболочка; 2 и 3 — вертикальные и диагональные пружинные растяжки; 4 — рама контейнера.

В процессе загрузки плодов. Эластичное днище оболочки минимизирует ударные воздействия на плоды. По мере заполнения оболочка опускается

вниз и незначительно деформируется [110]. В конечном итоге, когда она полностью заполнена, ее центр тяжести смещается вниз на величину  $\delta_1$  а верхняя часть на величину  $\delta_2$ . Прогиб днища составляет  $\delta_3$ . Из-за того, что днище прогибается боковые стенки оболочки смещаются к центру на величину  $\frac{1}{2}\delta_4$ . Последнее обстоятельство является самым важным. Именно за счет этого осуществляется упоминавшаяся выше боковая поддержка плодов, в соответствии с которой сближающиеся стенки контейнера поджимают плоды в горизонтальной плоскости. Причем, что очень важно, сила бокового поджатия всегда пропорциональна вертикальной нагрузке на плоды. Последний тезис в равной степени касается стационарного положения контейнера и процесса транспортирования по неровностям дороги.

3.2.2. Конструкция и параметры контейнера в целом. Конструкция предлагаемого многоярусного контейнера с эластичными оболочками (рис. 3.6) защищена авторскими свидетельствами на изобретения [111, 112] и подробно рассмотрена в следующих публикациях [113, 114].

Контейнер выполнен в виде жесткого прямоугольного каркаса, представляющего собой вертикальные стойки 1. На которых неподвижно закреплены боковые горизонтальные поперечины 2, используемые как направляющие для подвижных передних поперечин 4 верхних ярусов и задних поперечин 3. К этим поперечинам каркаса на подвижных разрезных кольцах 6 закреплены эластичные оболочки 5, которые можно свободно смещать (кроме нижней) к задним поперечинам вместе с передней. В рабочем положении оболочки крепятся с помощью пружинных растяжек 7.

В закрытых помещениях контейнер можно перемещать на собственных флюгерных колёсах, которые самостоятельно занимают положение по направлению движения. Для поднятия контейнера краном любого типа первый обеспечен специальными проушинами.

Загружать контейнер следует с нижней секции. Для этого оболочки, размещенные над ней, необходимо сместить к задним поперечинам каркаса и

компактно сложить (этим обеспечивается удобный доступ к нижней секции). Загрузив нижнюю секцию, в рабочее положение приводят последующую оболочку, размещенную выше, фиксируют её растяжками, которые застёгивают на вертикальных стойках каркаса. В такой последовательности загружают все оболочки контейнера.

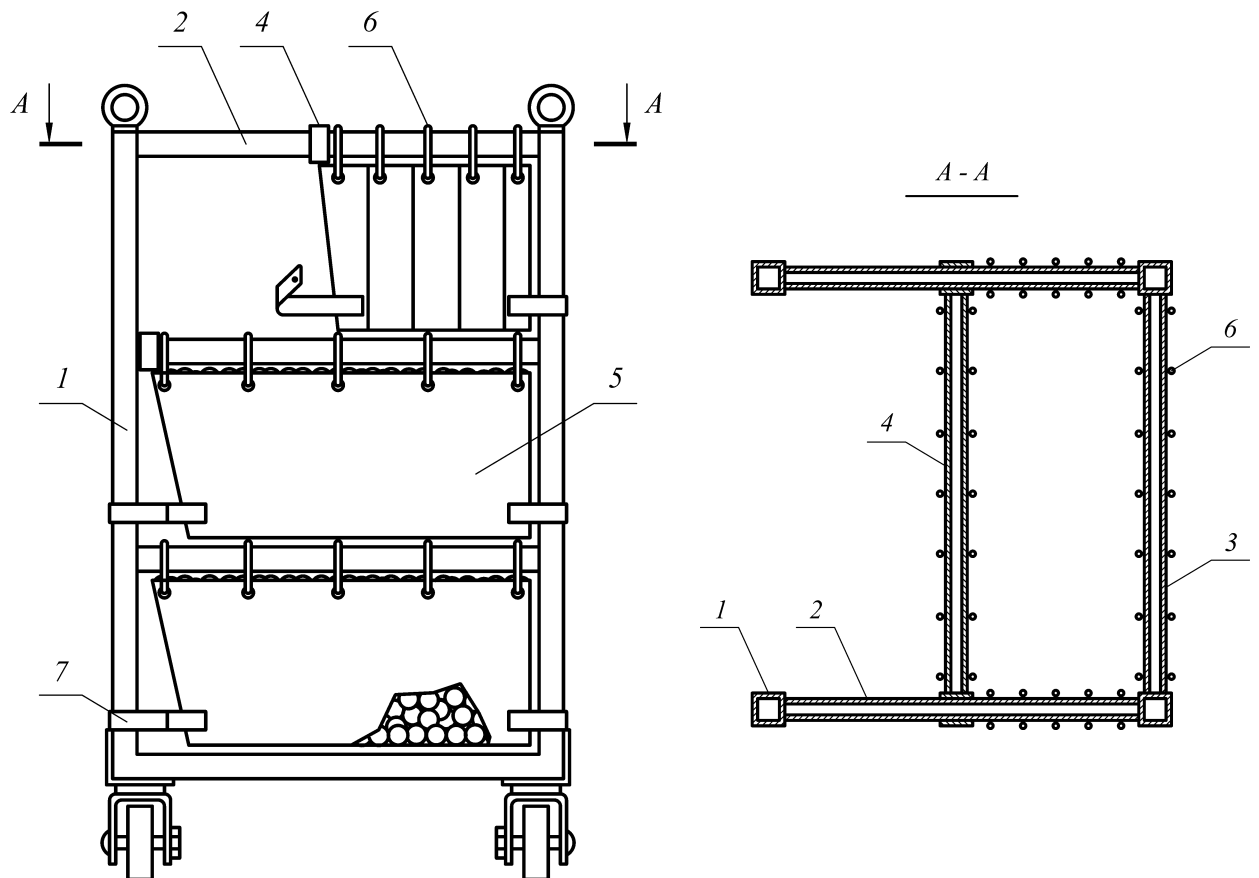


Рис. 3.6. Многоярусный контейнер с эластичными оболочками для транспортирования плодоовощной продукции: 1 — вертикальные стойки, 2 — боковые горизонтальные направляющие, 3 — неподвижные задние поперечины, 4 — подвижные передние поперечины, 5 — эластичные оболочки, 6 — пружинные кольца, 7 — горизонтальные растяжки.

Разгружать овощи из контейнера механизированным способом возможно переворачиванием. Для этого передняя стенка оболочки выполнена с наклоном к вертикальной оси с целью создания разгрузочного пространства. Во время реализации и для предреализационной обработки на предприятиях контейнеры разгружают в обратной последовательности. Сначала освобож-

дают верхнюю оболочку, после чего отстёгивают растяжки и смещают освобождённую оболочку вместе с передней поперечиной к задней стенке для создания доступа к овощам, которые находятся в оболочке размещённой ниже от освобождённой, и так до последней.

Параметры контейнера приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Параметры многоярусного контейнера с эластичными оболочками

| Наименование параметров                    | Единицы измерения | Величина           |
|--|-------------------|--------------------|
| Количество секций                          | шт.               | 3                  |
| Количество вертикальных растяжек на секции | шт.               | 24                 |
| Количество диагональных растяжек на секции | шт.               | 4                  |
| Грузоподъемность секции                    | кг                | 70                 |
| Грузоподъемность контейнера                | кг                | 210                |
| Собственный вес контейнера (нетто)         | кг                | 33                 |
| Полный вес контейнера (брутто)             | кг                | 243                |
| Габариты: ширина,<br>глубина,<br>высота    | мм                | 800<br>600<br>1200 |

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически обосновано, что существенный виброизолирующий эффект от применения пружинных подвесок секции контейнера достигается при условии, когда отношение возмущающей частоты воздействий  $\Omega$  к собственной частоте  $\omega$  секции контейнера удовлетворяет условию:  $0,82 > \Omega/\omega > 1,15$ . В этом случае динамическое (вибрационное) воздействие  $P_B$  на плоды даже без учета демпфирования может превышать статическое  $P_C$  не более чем в три раза.

2. Теоретически обосновано, что при расчетной грузоподъемности секции контейнера  $m_3 = 70$  кг условия предыдущего пункта будут гарантировано выполняться, если суммарная жесткость  $c_3$  пружинных подвесок секции контейнера будет укладываться в интервал  $c_3 \in [150, 550] \times 10^3$  Н/м.



3. Предлагаемая конструкция эластичных лотков секций контейнера закрепленных на пружинных растяжках внутри жесткого каркаса контейнера в полной мере реализует механизм боковой поддержки для транспортируемых плодов томатов и в конечном итоге должно способствовать повышению сохранности плодов при транспортировании.

4. Кроме снижения механических воздействий на плоды предлагаемая конструкция контейнера, более удобна в обслуживании. Прежде всего такой эффект достигается за счет улучшения доступа к нижним секциям путем складывания верхних, что осуществляется смещением подвижных передних поперечин в направлении задних.

5. Создана конструкция многоярусного контейнера с эластичными оболочками имеет конструктивную новизну и защищена авторским свидетельством на изобретение [112].

Основные научные результаты раздела опубликованы в трудах [97, 98, 101, 102, 110, 112, 113, 114]

## РАЗДЕЛ 4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ТОМАТОВ, ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОНТЕЙНЕРА И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЦЕЛОМ

#### 4.1. Физико-механические свойства плодов томатов

Основными физико-механическими свойствами плодов овощей и фруктов, влияющих на эффективность транспортирования являются: размеры, вес, плотность, толщина и прочность кожицы, сопротивляемость статическим и динамическим нагрузкам. Спецификой перечисленных характеристик является их вариабельность по отношению к биологическому виду плодов, их сорту и даже к отдельным плодам одного сорта. По этой причине, для оценки перечисленных показателей отдельных видов плодов используются усредненные величины.

Задачи исследования: определение величины статической разрушающей нагрузки плодов томатов в контакте с жесткими и эластичными поверхностями, определение модуля упругости плодов томатов, пластической постоянной, коэффициента трения и плотности томатов закрытого грунта.

Такого рода исследования в связи с регулярным появлением новых сортов остается актуальными всегда.

4.1.1 Программа экспериментальных исследований. Для проведения исследования использовались плоды томатов открытого грунта сортов «Атласный», «Барвинок», «Кременец», «Лагидный», «Серпневый», «Флора» и «V – 5F1», которые находятся на изучении в институте овощеводства и бахчеводства УААН в городе Мерефа, а также томаты закрытого грунта сортов «Верлиока» и «Красная стрела» выращиваемые в профильных хозяйствах Харьковской области.

Программа предусматривает выполнение следующих видов работ:

- 1) исследовать величину статической разрушающей нагрузки плодов томатов открытого и закрытого грунта в контакте с жесткими и эластичными поверхностями;
- 2) определить модуль упругости плодов томатов закрытого грунта;
- 3) определить коэффициент трения плодов томатов закрытого грунта на различных поверхностях;
- 4) определить плотность вещества зрелых плодов томатов;
- 5) оценка качественной стороны соответствия между законами деформирования модельного тела и реальными плодами томатов.

4.1.2 Методика экспериментальных исследований величины статической разрушающей нагрузки плодов томатов в контакте с жесткими и эластичными поверхностями.

Плоды томатов заготавливали в уборочный период с учетом требований необходимых для проведения экспериментальных исследований при изучении их физико-механических свойств [34, 35].

Перед испытанием плодов в начале визуально оценивали состояние каждого из них. На испытания направляли только спелые плоды, красного цвета, не имеющие видимых повреждений.

В соответствии с программой экспериментальных исследований необходимо установить величину разрушающей нагрузки плодов томатов вышеуказанных сортов в контакте с жесткой и эластичной поверхностями, для чего использовали прибор [98] представленный на рис. 4.1.

Прибор состоит из стойки 1, в верхней части которой находится силоизмерительный механизм, включающий стержень 2, передающий усилие на тарированную плоскую пружину 3, деформация которой пропорциональная нагрузке и измеряется индикатором часового типа 4. На нижнем конце стержня находится конический корпус 5б, к основанию которого при помощи винтов с шайбой крепится круглая пластина 6, вырезанная из эластичного материала или жесткая из оргстекла 5а. Такая же пластина закреплена и в

нижнем коническом корпусе 8б или 8а, свободно установленном на конце нагрузочного винта 9. При вращении винта 9 испытуемый образец 7 сжимается между установленными жесткими или эластичными поверхностями.

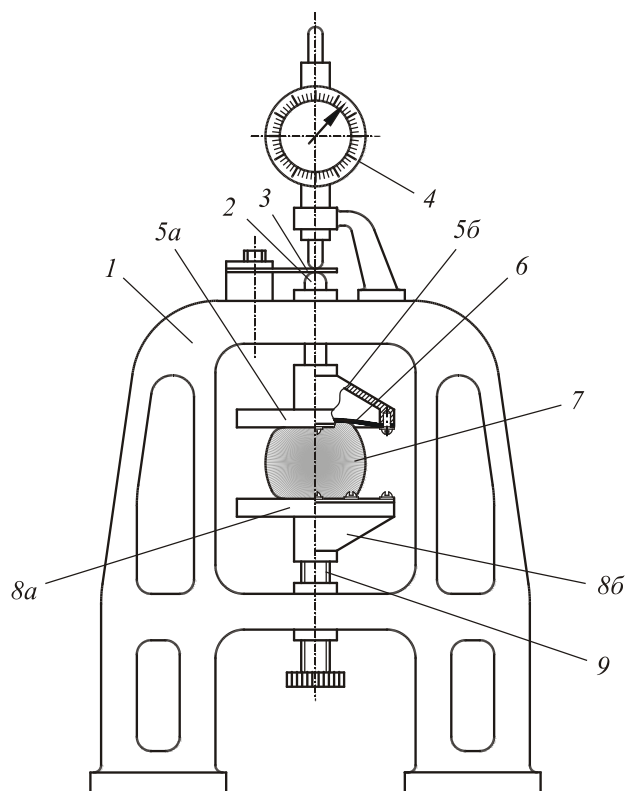


Рис. 4.1. Прибор для испытания плодов овощей сжимающей нагрузкой

Работа прибора. Осмотренный плод укладывали на нижний конус с жесткой или эластичной пластиной, и при помощи нагрузочного винта производили нагрузку. Когда винт закручивали, то он по резьбе подымал вверх соответственно конус вместе с плодом. При встрече плода с верхним конусом, имеющим поверхность, соответствующую нижней, жесткую или эластичную, тот приподымал его вверх, преодолевая жесткость измерительной пластины, которая передает перемещение на индикатор часового типа. По вращению стрелки на индикаторе определяли силу, действующую на испытуемый плод. Одно деление по шкале соответствует 1,0 Н силы. Плавно увеличивая нагрузку, необходимо внимательно следить за перемещением стрелки индикатора, которая вращается в соответствии с ростом нагрузки. В ка-

кой-то момент стрелка останавливается, а затем делает возврат на несколько делений. Это момент разрушения испытуемого плода. Показания стрелки в положении, когда она остановилась, следует зафиксировать. Это ее положение определяет величину разрушающей нагрузки плода.

Повторность опытов. Учитывая высокую вариабельность физико-механических свойств плодов томатов исследованиям подвергали определенное количество плодов, называемых выборкой. Количество плодов в выборке и, следовательно, повторность опыта ( $n$ ) зависят как от степени варьирования разрушающей нагрузки, так и от точности, с которой требуется получить результаты. При исследовании растительных объектов считается достаточным, чтобы показатель точности ( $\varepsilon$ ) опыта не превышал 4% [34, 60].

Количество плодов (повторностей опыта), которое необходимо подвергнуть испытанию для изучения статической разрушающей нагрузки, при их сжатии жесткими и эластичными поверхностями определяем итерационным методом [34, 115]. Для этого испытаниям подвергаем десять плодов каждого в отдельности сорта и по результатам вычисляем среднее значение разрушающей нагрузки ( $\bar{P}_p$ ) на плоды, выборочную дисперсию ( $s^2$ ), выборочное среднее квадратическое отклонение ( $s$ ), коэффициент вариации ( $v$ ) и необходимое количество повторностей опыта ( $n$ ). В конце эксперимента необходимое количество повторностей опыта уточняем. При необходимости продолжаем эксперимент и снова уточняем  $n$ .

4.1.3 Методика экспериментальной оценки модуля упругости плодов томатов. Особенность эксперимента в данном случае заключается в том, что приходится оценивать упругие характеристики, не нарушая целостности плодов, и учитывая их естественную геометрическую форму. Известная из работы [68] методика определения модуля упругости форму плода не учитывает. Это приводит к определению условного показателя, не соответствующего общепринятому понятию модуля упругости первого рода [116].

В настоящей работе при экспериментальной оценке модуля упругости

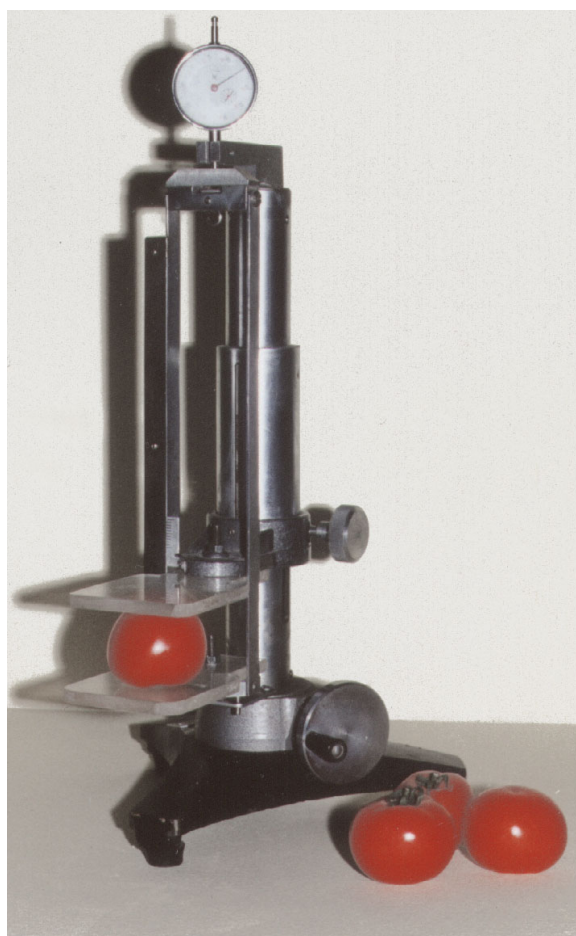
предполагается, что в пределах малых деформаций плод томата является однородным и изотропным упругим телом, имеющим в зоне контакта с нагружающей пластиной сферическую форму. Эти допущения достаточны для того, чтобы оценивать модуль упругости по диаметру отпечатка плода [68].

В качестве экспериментальной установки использовали прибор ДП-6А, предназначенный для определения характеристик винтовых пружин сжатия и растяжения. В нашем случае данный прибор (рис. 4.2) был дополнительно оборудован прозрачными пластинами 19 и 20 из оргстекла в качестве рабочего стола на который помещаются испытуемые плоды томатов. На верхней пластине нанесена миллиметровая сетка для определения площади контакта плода с контактируемой поверхностью при создании сжимающей нагрузки.

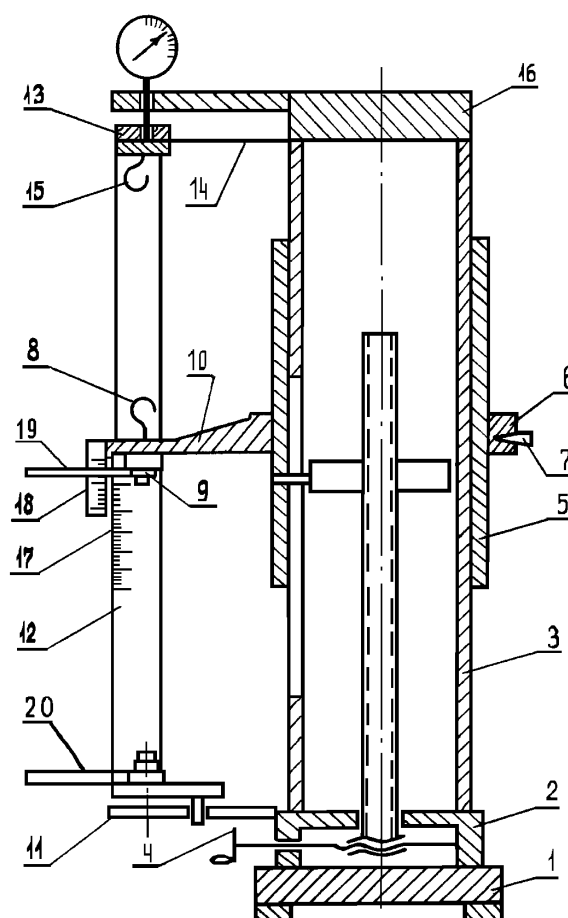
Описание прибора ДП-6А и принцип его работы. Прибор состоит из литого основания 1, к верхней плоскости которого крепится редуктор 2 и трубчатая колонка 3. На колонке смонтированы рабочая рамка, которая состоит из верхней 10 и нижней 11 траверс, соединенных между собой двумя плоскими металлическими полосами 12 и измерительные устройства 17, 18. Редуктор состоит из червяка, на конце которого закреплен маховичок 4 червячного колеса и ходового винта, расположенного внутри колонки. При вращении маховичка ходовой винт перемещает вдоль вертикальной оси прибора гайку-втулку 5. На втулку 5 посажен кронштейн 6, который можно перемещать вручную вдоль втулки и фиксировать в нужном положении ручкой 7.

На кронштейне 9 закреплена верхняя прозрачная пластина 19 из оргстекла, на которой нанесена миллиметровая сетка для определения площади контакта плода с контактируемой поверхностью при создании сжимающей нагрузки. На верхней траверсе закреплена перекладина 13, в нижней части которой имеются два шарика, упирающиеся в плоскую измерительную пружину 14. Верхняя траверса прикреплена к металлической пластине и закреплена на колонке. Нижняя траверса имеет два отверстия, в которые входят с зазором два направляющих штифта, закрепленных на планке, установленной на верхней части корпуса редуктора. В верхней части прибора закреплен

кронштейн 16 с индикатором часового типа, головка которого упирается в измерительную пружину 14.



а)



б)

Рис. 4.2. Установка для испытания плодов томатов сжимающей нагрузкой: а) общий вид прибора, б) схема прибора.

При перемещении кронштейна установленный плод на нижнюю пластину 20, нагружается сжимающим усилием. Это усилие передается рабочей рамке, которая деформирует предварительно оттарированную по нагрузке измерительную пружину, и далее — на индикатор, по отклонению стрелки которого определяют усилие, действующее на плод.

Деформацию плода определяем с помощью масштабной линейки 17 и конуса 18 на кронштейне. Точность измерения  $\pm 0,1$  мм.

Для проведения эксперимента, в начале кронштейн 6 перемещаем и закрепляем в нижнем положении. На пластину из оргстекла помещаем плод

томата и вращением маховичка слегка нагружаем его (отклонение стрелки индикатора 3-5 делений). Фиксируем на масштабной линейке показания, затем нагружаем плод заданным усилием 10 Н (по показанию стрелки индикатора) и определяем деформацию по изменению показаний масштабной линейки и нониуса, а также площадь контакта плода с пластиной по масштабной сетке имеющейся на пластине. В дальнейшем увеличиваем нагрузку с интервалом в 10 Н, определяя при этом соответствующую деформацию и площадь контакта плода с нагружаемой пластиной. Последнее повторяем до появления признаков разрушения плода.

4.1.4 Методика экспериментальной оценки коэффициента трения плодов томатов на различных поверхностях. Коэффициент трения плодов томатов давно интересовал исследователей и неплохо изучен. Но также известно, что в природе не бывает одинаковых плодов на одном растении, а тем более разных сортов. Многие исследователи [18, 33 – 41] изучая физико-механические свойства плодов томатов определяли такой показатель, как угол качения плодов. Известно, что плоды томатов по своей природе имеют круглую форму и по известной методике [34], плод помещенный на наклонную поверхность быстрее стремится катиться нежели скользить.

В наших исследованиях, чтобы избежать качения, плоды томатов по несколько штук, не менее трех, склеивали липкой лентой. Склеенную группу плодов помещали на исследуемую поверхность прибора (рис. 4.3). Медленным вращением ручки один край поверхности перемещали вверх до момента начала скольжения плодов. В этот момент останавливали вращение и по шкале определяли угол скольжения.

4.1.5 Методика экспериментальной оценки плотности вещества зрелых плодов томатов. Для вычисления плотности  $\gamma$  (в г/мл) необходимо измерять объем каждого из плодов и его массу. Первое удобнее всего выполнять путем погружения плодов в частично заполненный водой мерный



цилиндр. По изменению объема жидкости в цилиндре судят об объеме погруженных в нее плодов. Масса плодов определяется путем взвешивания. Плотность плодов определяется как отношение их массы к объему.

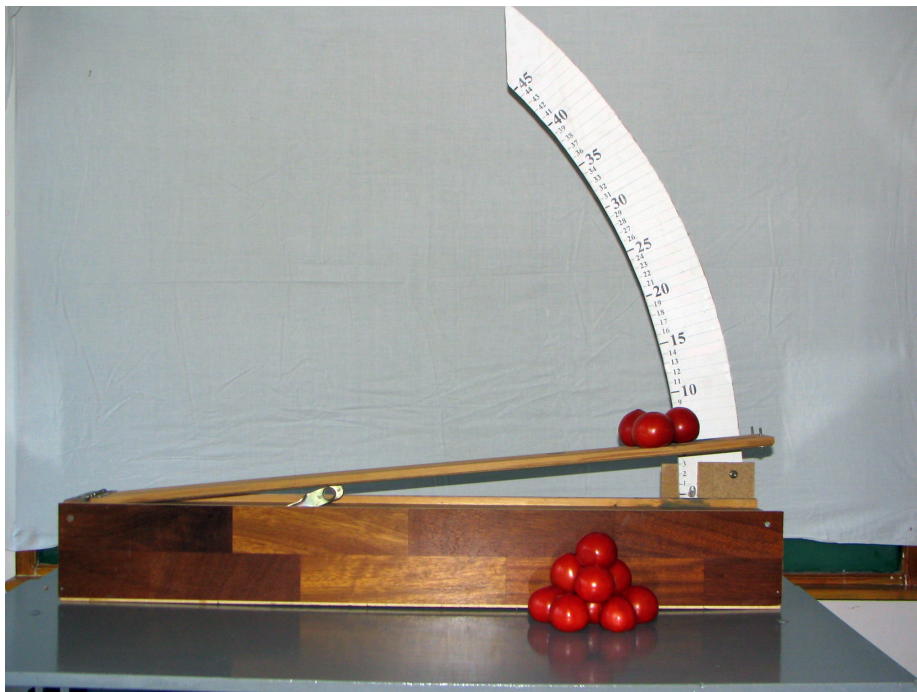


Рис. 4.3. Прибор для изучения угла скольжения испытуемых образцов по поверхности.

4.1.6 Методика экспериментальной оценки качественной стороны соответствия между законами деформирования модельного тела и реальными плодами томатов. Суть методики состоит в сравнении расчетных и экспериментальных закономерностей.

Для получения экспериментальных закономерностей использовали уже известный прибор ДП-6А с авторскими доработками (рис. 4.2). Текущая методика во многом совпадает с таковой для оценки модуля упругости. Разница состоит в том, что в этот раз измерению подвергали величину коэффициента деформации плодов  $\delta$  (2.81) и вызвавшую ее силу  $I_{u0}$ .

Затем задействовав математические модели из второго раздела строили графики функциональных связей  $\delta = \delta(I_{u0})$  по типу рис. 2.33. Такие графики строили для каждого плода отдельно подбирая величину пластической по-

стоянной  $k$  используя метод наименьших квадратов [117]. Это позволяло получить теоретические кривые  $\delta = \delta(I_{u0})$ , которые наилучшим образом аппроксимировали экспериментальные точки. Усреднив величину расчетного значения  $k$  для всей совокупности экспериментов сопоставили полученное значение с теми, которые применялись ранее во втором разделе.

В процессе построения кривых  $\delta = \delta(I_{u0})$  все иные исходные данные соответствовали экспериментальным данным, относящимся к конкретным плодам, прошедшим испытания.

Полученное таким образом среднее значение пластической постоянной  $k$  не является таковым в полном физическом смысле. Причина в том, что цилиндрическое модельное тело единичной длины естественным образом отличается от реального сферического по форме плода. Важно качественное совпадение закономерностей, когда расчетные кривые  $\delta = \delta(I_{u0})$  надлежащим образом аппроксимируют облако экспериментальных точек. Не претендуя на высокую точность, последнее оценивали визуально.

4.1.7 Результаты экспериментальных исследований величины статической разрушающей нагрузки плодов томатов. Для определения размера выборки произвели испытание плодов в количестве по 10 штук каждого сорта. Результаты измерений и их статистическая обработка приведены в приложении Г (табл. Г.1 – Г.4). Используя данные статистической обработки, определяем первое приближенное значение необходимого объема испытаний по формуле:

$$n_1 = \frac{t_\gamma^2 v^2}{\varepsilon^2}, \quad (4.1)$$

где  $t_\gamma^2$  — квантиль распределения Стьюдента [117].

Расчетные значения количества плодов томатов, необходимого для изучения статической разрушающей нагрузки томатов открытого и закрытого грунта по сортам, сводим в табл. 4.1.

По данным, полученным в результате статистической обработки числа повторностей  $n$ , два сорта томатов „Лагидный” в контакте с жесткой поверхностью и „Серпневый” в контакте с эластичной поверхностью имеют соответственно 102 и 103 необходимых числа повторностей, а остальные сорта томатов имеют меньшее число повторностей, близкое к 100. Поэтому принимаем для всех сортов число повторностей, равное 100.

Таблица 4.1

Результаты числа повторностей при исследовании сопротивления томатов открытого и закрытого грунта по сортам статическим сжимающим нагрузкам созданными жесткими/эластичными поверхностями

| Сорт томатов                                      | Среднее значение разрушающей нагрузки ( $\bar{P}_p$ ) | Выборочная дисперсия ( $s^2$ ) | Коэффициент вариации ( $v$ ) | Число повторностей ( $n$ ) |
|---|---|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Т о м а т ы   о т к р ы т о г о   г р у н т а     |   |                                |                              |                            |
| Атласный  | 58,04 / 70,09   | 14,3 / 11,1                    | 0,24 / 0,15                  | 93 / 39                    |
| Барвинок  | 39,18 / 46,66   | 9,6 / 11,3                     | 0,25 / 0,24                  | 92 / 90                    |
| Кременец  | 50,14 / 50,5  | 11,2 / 12,6                    | 0,22 / 0,24                  | 76 / 96                    |
| Лагидный  | 31,24 / 34,6  | 8,0 / 7,3                      | 0,26 / 0,21                  | 102 / 69                   |
| Серпневый   | 33,56 / 45,07   | 7,9 / 11,7                     | 0,24 / 0,26                  | 86 / 103                   |
| Флора   | 30,74 / 36,9  | 7,4 / 9,3                      | 0,24 / 0,25                  | 90 / 97                    |
| V-5 F1  | 42,11 / 49,78   | 7,5 / 11,2                     | 0,18 / 0,22                  | 50 / 78                    |
| Т о м а т ы   з а щ и щ е н н о г о   г р у н т а |   |                                |                              |                            |
| Верлиока  | 54,23 / 68,12   | 9,3 / 16,2                     | 0,17 / 0,23                  | 46 / 87                    |
| Красная стрела                                    | 45,98 / 60,56   | 10,8 / 10,5                    | 0,23 / 0,17                  | 85 / 47                    |

Устойчивость отдельных плодов к механическим воздействиям зависит от многих факторов, в том числе имеющих случайный характер. Поэтому результаты исследований имеют статистический вероятностный характер. Данные измерений разрушающей нагрузки плодов томатов открытого и закрытого грунта в контакте с жесткими и эластичными поверхностями, а также результаты статистической обработки наблюдений представлены в таблицах приложения Д, Е за данными таблиц построены графики (рис. 4.4).

Методом максимального правдоподобия определены средние значения разрушающей нагрузки  $\bar{P}_p$  на плоды, выборочное среднее квадратическое отклонение  $s$ , выборочная дисперсия  $s^2$ , коэффициент вариации  $v$  и

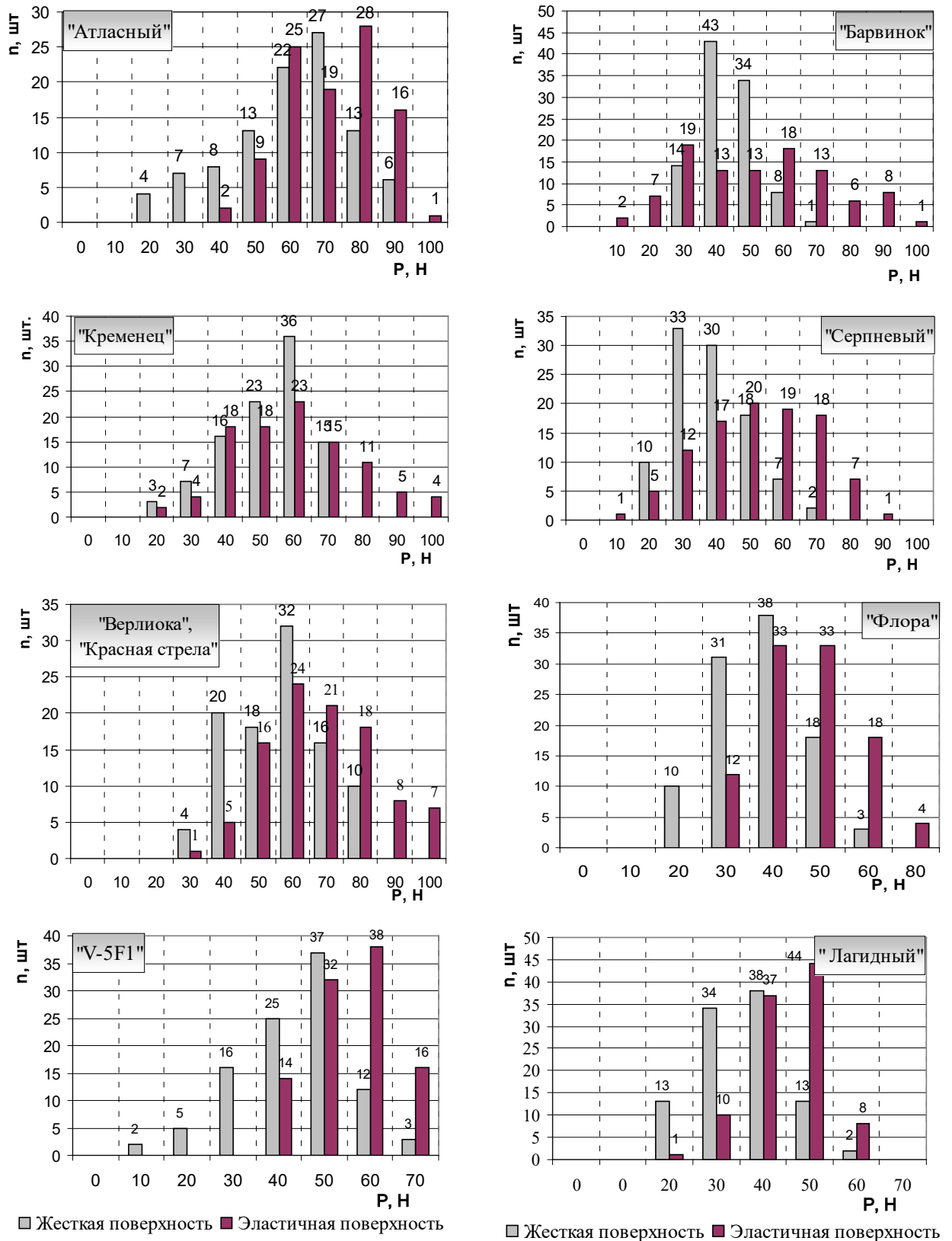


Рис 4.4. Результаты разрушающей нагрузки плодов томатов по сортам при нагружении жесткими и эластичными поверхностями

установлены доверительные интервалы значений разрушающей статической нагрузки на плоды:

нижняя интервальная оценка

$$\underline{P}_p = \bar{P}_p - t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (4.2)$$

верхняя интервальная оценка

$$\bar{P}^p = \bar{P}_p + t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (4.3)$$

Для пятипроцентного уровня значимости ( $\lambda = 0,05$ ), доверительной вероятности 95% ( $\gamma = 0,95$ ), принимаем  $t_\gamma = 1,96$  [34, 117].

Результаты расчета доверительных интервалов разрушающей сжимающей нагрузки приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Доверительные интервалы разрушающей сжимающей нагрузки на плоды томатов открытого и закрытого грунта в контакте с жесткими и эластичными поверхностями

| Плоды томатов    | Поверхность контакта | Разрушающая нагрузка, Н               |                                  |
|------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
|                  |                      | Нижнее значение,<br>$\underline{P}_p$ | Верхнее значение,<br>$\bar{P}^p$ |
| Открытого грунта | жесткая              | 38,6                                  | 42,3                             |
|                  | эластичная           | 44,31                                 | 53,13                            |
| Закрытого грунта | жесткая              | 48,71                                 | 53,39                            |
|                  | эластичная           | 58,23                                 | 64,37                            |

Результаты разрушающей нагрузки томатов открытого и закрытого грунта при сжатии их между жесткими и эластичными поверхностями, как показывает анализ, подтверждают теоретические исследования, стойкость плодов к сжимающим статическим нагрузкам или величина разрушающей нагрузки на плоды при контакте с эластичными поверхностями возрастает в 1,13...1,4 раза по сравнению с жесткой поверхностью [98, 118]. Это объясняется, тем, что контактирующие эластичные поверхности при нагружении принимают форму плодов, значительно увеличивая контактируемую поверхность. Кроме того, деформация эластичной

контактной поверхности способствует уменьшению контактных напряжений, что подтверждает обоснованность и целесообразность дальнейшего развития и совершенствования мягкой и комбинированной транспортной тары для транспортирования плодоовощной продукции.

Приведенные выше результаты нашли применение в предыдущей главе (табл. 3.1) при обосновании высоты секции многоярусного контейнера  $h_{СК}$  (3.24) предлагаемой конструкции.

4.1.8 Результаты экспериментальных исследований модуля упругости плодов томатов. Исходя из известного решения контактной задачи Герца [68], диаметр  $D$  пятна при контактировании упругой сферы радиуса  $R$  с упругой плоскостью под действием сжимающей силы  $Q$ , определяется по формуле:

$$D = 1,8172 \cdot \sqrt[3]{Q \cdot R \left( \frac{1 - \mu_T^2}{E_T} + \frac{1 - \mu_0^2}{E_0} \right)}, \quad (4.4)$$

где:  $E_T$  и  $E_0$  — модули упругости плода и пластины (в Н/мм<sup>2</sup>);  $\mu_T$  и  $\mu_0$  — коэффициенты Пуассона плода и пластины.

Учитывая, что в данном эксперименте  $E_T \ll E_0$ , вторым слагаемым в скобках (4.4) можно пренебречь, после чего получаем выражение для модуля упругости плода:

$$E_T = \frac{6 \cdot Q \cdot R \cdot (1 - \mu_T^2)}{D^3} \quad (4.5)$$

Выражение (4.5) использовали при обработке результатов эксперимента, в котором нагрузка  $Q$  на каждый плод изменялась и измерялась соответствующая площадь отпечатка  $F$ . Используя  $F$  рассчитывали величину условленного диаметра  $D = 2(F/\pi)^{\frac{1}{2}}$ . Коэффициент Пуассона принимали равным  $\mu_T = 0,15$  [66]. Результаты эксперимента приведены в табл. 4.3.

Таким образом, полученное среднее значение модуля упругости томата существенно отличается от приведенного в [66] ( $80 \cdot 10^3$  Па) в сторону увели-

чения более чем в два раза. Это уточнение получено в основном за счет учета реальной формы плода томата.

Таблица 4.3

Результаты наблюдений исследования модуля упругости плодов томатов при нагружении жесткими плоскостями.

| Средний диаметр плода, мм. | Нагрузка $Q$ , Н. | Диаметр пятна контакта $D$ , мм. | Модуль упругости плода $E_T$ , Н/мм <sup>2</sup> |
|----------------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| 50                         | 20                | 21,85                            | 0,281  |
|                            | 30                | 27,0                             | 0,223  |
|                            | 40                | 31,91                            | 0,181  |
|                            | 50                | 35,68                            | 0,161  |
| 55                         | 20                | 24,95                            | 0,208  |
|                            | 30                | 27,0                             | 0,246  |
|                            | 40                | 33,85                            | 0,166  |
|                            | 50                | 35,56                            | 0,179  |
| 55                         | 20                | 22,55                            | 0,281  |
|                            | 30                | 28,77                            | 0,203  |
|                            | 40                | 30,9                             | 0,219  |
|                            | 50                | 35,2                             | 0,185  |
| 60                         | 20                | 21,1                             | 0,375  |
|                            | 30                | 27,0                             | 0,268  |
|                            | 40                | 29,8                             | 0,266  |
|                            | 50                | 35,2                             | 0,202  |
|                            | 60                | 36,1                             | 0,224  |
| 60                         | 20                | 19,5                             | 0,475  |
|                            | 30                | 26,5                             | 0,284  |
|                            | 40                | 35,7                             | 0,155  |
|                            | 50                | 39,9                             | 0,138  |
|                            | 60                | 44,1                             | 0,123  |
| 60                         | 20                | 19,5                             | 0,475  |
|                            | 30                | 24,6                             | 0,355  |
|                            | 40                | 29,3                             | 0,280  |
|                            | 50                | 35,2                             | 0,202  |
|                            | 60                | 39,9                             | 0,166  |
|                            | 70                | 45,8                             | 0,128  |
| 60                         | 20                | 23,9                             | 0,258  |
|                            | 30                | 30,4                             | 0,188  |
|                            | 40                | 34,8                             | 0,167  |
| 65                         | 20                | 24,6                             | 0,256  |
|                            | 30                | 32,4                             | 0,168  |
|                            | 40                | 37,4                             | 0,146  |

В результате проверки упругих свойств плодов томатов было выявлено, что если эти свойства оценивать только по величине полученного значе-

ния модуля упругости то получается, что пренебрегать этими свойствами нельзя. С другой стороны было обнаружено, что предел упругости для плодов томатов открытого и закрытого грунта составляет 28...36% от  $\bar{P}_p$  (табл. 4.2). За пределами этой нагрузки остаточные деформации почти неизбежны, хотя формально плод остается целым и держит нагрузку. Поскольку с позиций сохранности плодов допускать остаточные деформации нельзя то в процессе расчета геометрических и конструктивных параметров предлагаемого контейнера упругими свойствами томатов было решено пренебречь.

Правомерность такого подхода подтвердили дальнейшие эксперименты по выяснению качественного соответствия между законами деформирования модельного пластического тела и реальными плодами томатов.

4.1.9 Результаты экспериментальных исследований внешнего коэффициента трения плодов по различным поверхностям. Результаты экспериментов сведены в табл. 4.4

Таблица 4.4

Экспериментальные значения коэффициента  $f$  внешнего трения плодов томатов (в порядке возрастания)

| Материал           | $f$  | Материал                        | $f$  |
|--------------------|------|---------------------------------|------|
| Фанера (гладкая)   | 0,27 | Органическое стекло (смазанное) | 0,49 |
| Железо листовое    | 0,32 | Органическое стекло (сухое)     | 0,51 |
| Материал оболочки  | 0,40 | Лента транспортерная            | 0,55 |
| Картон упаковочный | 0,42 | Пенопласт упаковочный           | 0,62 |

Как было установлено теоретическими исследованиями второй главы, коэффициент внешнего трения оказывает существенное влияние на стойкость плодов выдерживать внешние силовые воздействия. Чем меньше  $f$ , тем равномернее распределяются напряжения в их объеме. Это обстоятельство можно и нужно использовать в процессе выбора материала для эластичных оболочек лотков многоярусного контейнера.



4.1.10 Результаты экспериментальных измерений плотности вещества зрелых плодов томатов. Как показал эксперимент значение плотности вещества составляющего плод томата значительно варьирует от сорта к сорту (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Экспериментальные значения плотности  $\gamma$  (в г/мл) вещества, составляющего зрелые (красные) плоды томатов (по сортам)

| Сорт томатов     | $\gamma$ | Сорт томатов | $\gamma$ | Сорт томатов | $\gamma$ |
|------------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| Атласный         | 0,96     | Кременец     | 0,81     | Серпневый    | 1,12     |
| Барвинок         | 1,00     | Лагидный     | 0,98     | Флора        | 1,02     |
| V-5F1            | 0,99     |              |          |              |          |
| Среднее значение |          |              |          |              | 0,98     |

Замечено также, что плоды, плотность которых меньше единицы имеют весьма плохую транспортабельность. Это связано с наличием пустот в их объеме. В результате остаточные деформации они приобретают уже после незначительных внешних силовых воздействий.

4.1.11 Результаты экспериментальной оценки качественной стороны соответствия между законами деформирования модельного тела и реальными плодами томатов. Первичный цифровой материал экспериментальной оценки связи между величиной  $\delta$  коэффициента деформации плодов томатов и величиной  $I_{u0}$  статического силового воздействия на них, когда сжатие осуществляется между двумя параллельными жесткими пластинами из сухого органического стекла (коэффициент внешнего трения  $f = 0,51$ ) приведен в приложении Ж.

После обработки экспериментальных данных в соответствии с изложенной выше методикой (п. 4.1.6) для каждого из испытуемых плодов были получены значения пластической постоянной  $k$ , применение которых позволяет получить теоретические кривые  $\delta = \delta(I_{u0})$ , наилучшим образом аппроксимирующие экспериментальные точки табл. 4.6.

Таблица 4.6

Расчетные значения пластической постоянной  $k$  (в Н/мм<sup>2</sup>)

| Плод | Пластическая постоянная $k$ | Плод | Пластическая постоянная $k$ | Плод | Пластическая постоянная $k$ |
|------|-----------------------------|------|-----------------------------|------|-----------------------------|
| 1    | 0,082                       | 2    | 0,090                       | 3    | 0,071                       |
| 4    | 0,096                       | 5    | 0,094                       | 6    | 0,089                       |
| 7    | 0,097                       | 8    | 0,072                       | 9    | 0,090                       |
| 10   | 0,092                       | 11   | 0,094                       |      |                             |

На рис. 4.5 представлен полученный расчетным путем график зависимости  $\delta = \delta(I_{u0})$  между величиной коэффициента деформации  $\delta$  плода томата и интенсивностью силового воздействия  $I_{u0}$  на него. На этот график наложены экспериментальные точки, относящиеся к плоду №7 (прил. Ж).

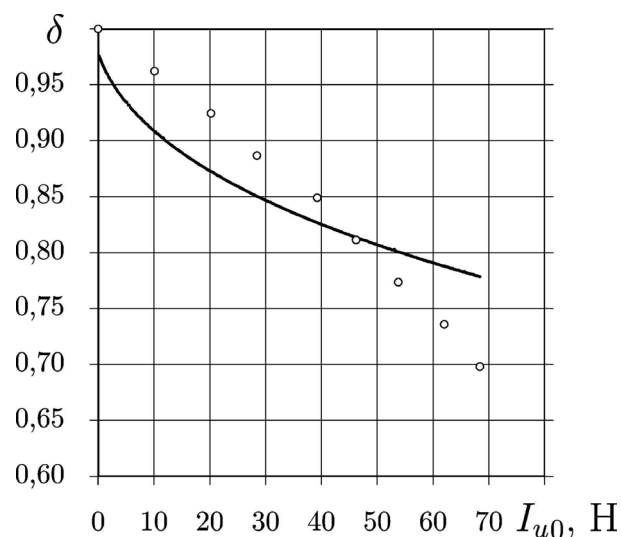


Рис 4.5. Пример соответствия экспериментальных точек (прил. Ж, плод №7) теоретической зависимости  $\delta = \delta(I_{u0})$  между величиной коэффициента деформации  $\delta$  плодов томатов и интенсивностью силового воздействия  $I_{u0}$

Аналогичным образом выглядят и все другие графики, относящиеся к оставшимся десяти плодам, испытанным в ходе эксперимента (прил. Ж). Как видим, теоретическая кривая хоть и не аппроксимирует экспериментальные данные, но имеет совпадающую с ними тенденцию. С увеличением внешней нагрузки и экспериментальные, и теоретические значения коэффициента де-

формации монотонно убывают.

Из табл. 4.6 видно, что экспериментальные значения пластической постоянной  $k$  укладываются в диапазон  $k \in [0,071; 0,097]$  (среднее значение  $k = 0,084$ ), являющийся частью более широкого интервала  $k \in [0,01; 0,15]$  (в Н/мм<sup>2</sup>), который был исследован в гл. 2, в частности при построении рис. 2.33. Последнее обстоятельство позволяет заключить, что выводы, сделанные во второй главе, являются достоверными, а, значит, вполне можно ожидать, что в случае обеспечения боковой поддержки плодов томатов, которая реализуется в предлагаемой конструкции контейнера, в процессе транспортирования плоды будут повреждаться меньше.

#### 4.2. Исследования элементов конструкции контейнера

В предыдущей главе, в процессе обоснования высоты ( $h_{СК}$ ) и конструкции секции многоярусного контейнера было решено выполнить ее из эластичного тканого материала, подвешенного на пружинных вертикальных растяжках (рис. 3.5). При этом было обосновано, что суммарная жесткость пружин подвески должна попадать в исследованный диапазон  $c_3 \in [50, 450] \times 10^3$  Н/м. Конструктивно пружины вертикальной подвески представляют собой одетые на раму контейнера кольца, изготовленные из пружинной проволоки диаметром 2 мм. Диаметр колец равен 38 мм. В дальнейшем следует определиться сколько таких колец должно быть в конструкции. Чем больше колец, тем равномернее закрепляется верхний обрез оболочки секции контейнера и тем больше их суммарная жесткость  $c_3$ . Управлять последней можно варьируя величиной перекрытия витков колец.

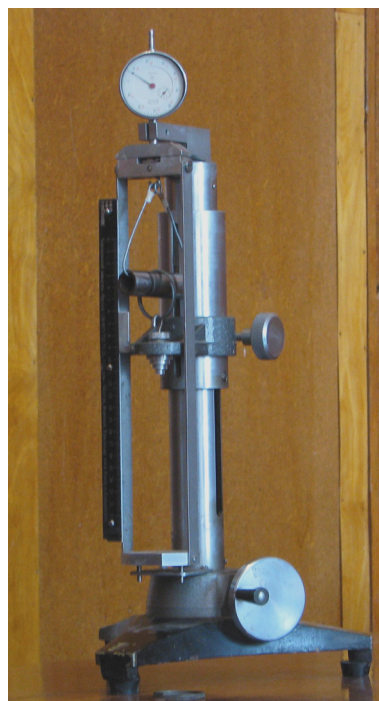
В процессе штатного функционирования оболочка секции контейнера должна прогибаться на величину  $\delta_3$  растягивая вертикальные и диагональные растяжки. В основном именно жесткость диагональных растяжек и их

собственная растяжимость  $\frac{1}{2}\delta_4$  определяет величину  $\delta_3$ . Вместе величины  $\delta_3$  и  $\delta_4$  определяет интенсивность боковой поддержки плодов томатов. О важности последней говорилось во второй главе. Сейчас необходимо практически оценить величину  $(\delta_2 + \delta_3)$ , с тем, что бы определиться, на каком расстоянии располагать секции друг над другом. В статическом состоянии между секциями должен сохраняться видимый просвет, превышающий 10 мм. Поскольку в процессе транспортировки секции контейнера колеблются синхронно, то динамический характер штатных воздействий не приведет к соприкосновению днища одной секции к томатам верхнего слоя другой секции.

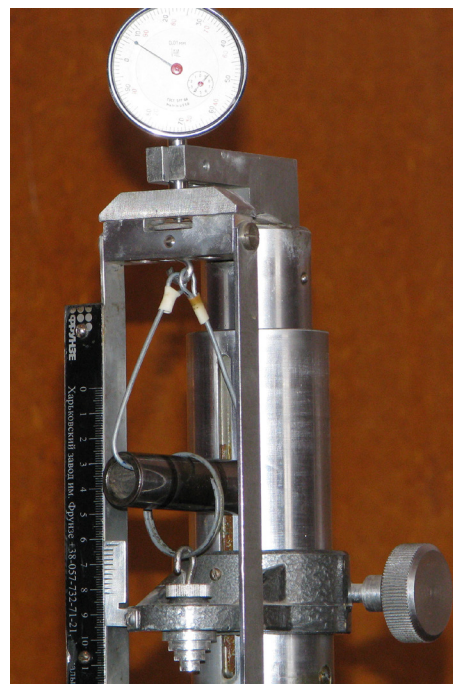
4.2.1. Программа исследований. Учитывая изложенное выше, программа исследований элементов конструкции контейнера предполагает два пункта: а) измерение жесткости пружинных колец вертикальной подвески; б) измерение прогиба днища оболочки секции под статической нагрузкой.

4.2.2. Методика и результаты исследований. Методика экспериментальной оценки жесткости пружинных колец вертикальной подвески предусматривает исследование колец диаметром 38 мм и различным количеством витков (1,5; 1,75; 2,0), изготовленных из пружинной стали диаметром 2 мм. В качестве лабораторной установки используем известный прибор ДП-6А, предназначенный для измерения жесткости пружин (рис. 4.6а).

Для того чтобы условия были максимально приближены к реальным, пружинное кольцо помещаем на отрезок трубы диаметром равным трубе каркаса контейнера, а отрезок соответственно закрепляем на установке (рис. 4.6б). Нагружаем кольцо от 0 до 10 кг с интервалом в 1кг. Результаты нагружения пружинных колец представлены в табл. 4.7.



а



б

Рис. 4.6. Экспериментальная установка для измерения жесткости пружин:  
а) общий вид установки; б) фрагмент крепления пружинного кольца

Для получения значений жесткости колец  $c_K$  каждой группы экспериментальные данные табл. 4.7 аппроксимировали прямыми (табл. 4.8). Величина  $c_K$  отличается от углового коэффициента только единицами измерения.

Таблица 4.7

Результаты измерения жесткости пружинных колец вертикальной подвески оболочки секции контейнера

| Количество витков кольца | Нагрузка, в кг          |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
|--------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
|                          | 0                       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    | 8   | 9   | 10  |
|                          | Деформация кольца, в мм |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,5                      | 0                       | 1   | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,7 | 3   | 3,5  | 4   | 4,5 | 5   |
| 1,75                     | 0                       | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,70 | 3   | 3,5 | 3,8 |
| 2,0                      | 0                       | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 1   | 1,5 | 1,7  | 2,1 | 2,5 | 2,7 |

Поскольку очевидно, что подвеска оболочки секции контейнера тем равномернее, чем больше колец используется в ней, то исходя из результатов экспериментов по оценке жесткости колец (табл. 4.8), было решено в конструкции контейнера использовать кольца с минимальным перекрытием, т.е.

с количеством витков, равным 1,5. Эти кольца имеют наименьшую жесткость. Поскольку суммарная жесткость подвески оболочки секции контейнера  $c_3$  определяется как произведение  $c_3 = n_K c_K$ , где,  $n_K$  — количество пружинных колец в подвеске, то имея ввиду максимальную величину  $c_3$  из теоретически исследованного диапазона значений  $c_3 \in [150, 550] \times 10^3$  Н/м, можно заключить, что предел суммарной жесткости подвески не будет превышен, если общее количество колец будет равным  $n_K = 28$  шт. Из компоновочных соображений было принято  $n_K = 24$  шт. В таком случае пружинные кольца подвески располагаются через каждые 10 см периметра оболочки секции контейнера. Угловые точки исключаются.

Таблица 4.8

Результаты прямолинейной аппроксимации экспериментальных данных по оценке жесткости пружинных колец вертикальной подвески оболочки секции контейнера

| Группа колец по количеству витков | Угловой коэффициент | Свободный член | Жесткость кольца $c_K$ , в $10^3$ Н/м |
|-----------------------------------|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| 1,5                               | 1,997               | -0,066         | 19,59                                 |
| 1,75                              | 2,624               | 0,037          | 25,74                                 |
| 2,0                               | 3,752               | 0,055          | 36,81                                 |

Методика исследования прогиба  $(\delta_2 + \delta_3)$  эластичной оболочки под статической ступенчатой нагрузкой (рис. 3.5).

Для этих целей нами был взят опытный образец контейнера, к дну одной из оболочек прикрепили стрелку, а к стойке каркаса контейнера – линейку со шкалой. Ступенчато увеличивая массу груза, через 5 кг, в эластичной оболочке, фиксируем прогиб дна эластичной оболочки по перемещению стрелки вдоль шкалы линейки, а результаты записываем в табл. 4.9.

Из табл. 4.8 видно, что при полной загрузке секции контейнера в 70 кг, прогиб днища  $(\delta_2 + \delta_3)$  составляет 41 мм. Таким образом, если секции контейнера расположить друг над другом на расстоянии 60 мм, то между ними будет гарантированный просвет превышающий заданную величину 10 мм.

Таблица 4.9

Прогиб дна эластичной оболочки многоярусного контейнера при ступенчатом статическом нагружении

| Нагрузка, кг | Прогиб, мм | Нагрузка, кг | Прогиб, мм |
|--------------|------------|--------------|------------|
| 5            | 15         | 40           | 36         |
| 10           | 22         | 45           | 37         |
| 15           | 26         | 50           | 38         |
| 20           | 28         | 55           | 39         |
| 25           | 31         | 60           | 40         |
| 30           | 33         | 65           | 40,5       |
| 35           | 34,5       | 70           | 40,5       |

#### 4.3. Оценка эффективности контейнеров предлагаемой конструкции

Задачи исследования: сравнительная оценка повреждаемости плодов томатов при динамических нагрузках в стандартных деревянных ящиках и многоярусных контейнерах с эластичными оболочками. На основании этих сравнительных исследований следует сделать вывод касательно обоснованности принятых решений при создании контейнера.

4.3.1 Программа оценки эффективности контейнеров предлагаемой конструкции. Программа предусматривает выполнение следующих видов работ: провести лабораторные испытания по определению интенсивности повреждаемости плодов томатов в многоярусных контейнерах с эластичными оболочками и деревянных ящиках при динамической нагрузке.

4.3.2 Методика лабораторных исследований повреждаемости плодов томатов в многоярусном контейнере с эластичными оболочками. Наиболее эффективными представляются методы определения повреждений и потерь плодоовощной продукции в условиях достаточно близких к условиям работы реальных систем. С этой целью, в лаборатории ХНТУСХ при кафедре ЭМТП, в процессе проведения исследований повреждений плодов томатов, которые выполнялись совместно с институтом овощеводства и бахчеводства Украинской Академии Аграрных Наук (ИОБУА-

АН) город Мерефа Харьковского района, был задействован специальный стенд имитации транспортного процесса СИТ-4 (рис. 4.1) [97].

Стенд имеет литую чугунную станину 1, к которой на пружинах 3 подвешена баластная платформа 2. На платформе смонтирован механизм скоростей 4 и механизм вибрации 6, на котором устанавливается рабочая платформа 7, и имеет четыре пары приемно-дисковых колес с закрепленными на ней видами тары 5 для испытаний.

Механизм вибрации приводится в движение от вала электрического двигателя через муфту и механизм скоростей. Сам механизм скоростей представляет собой редуктор с переменными шестернями и две звездочки с цепной передачей на валы, где содержатся колеса кулачкового профиля.

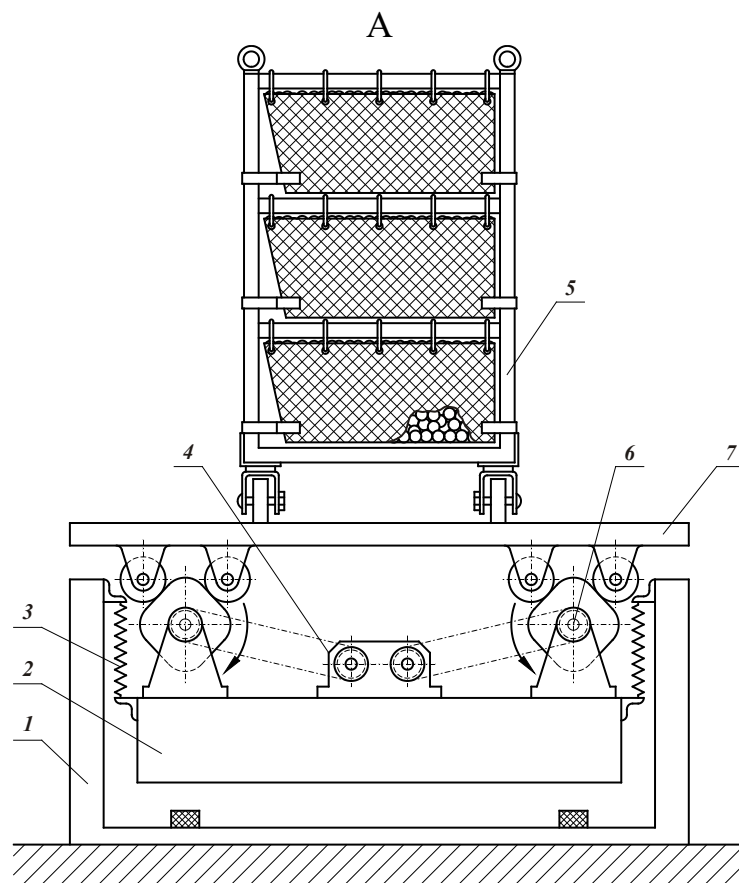
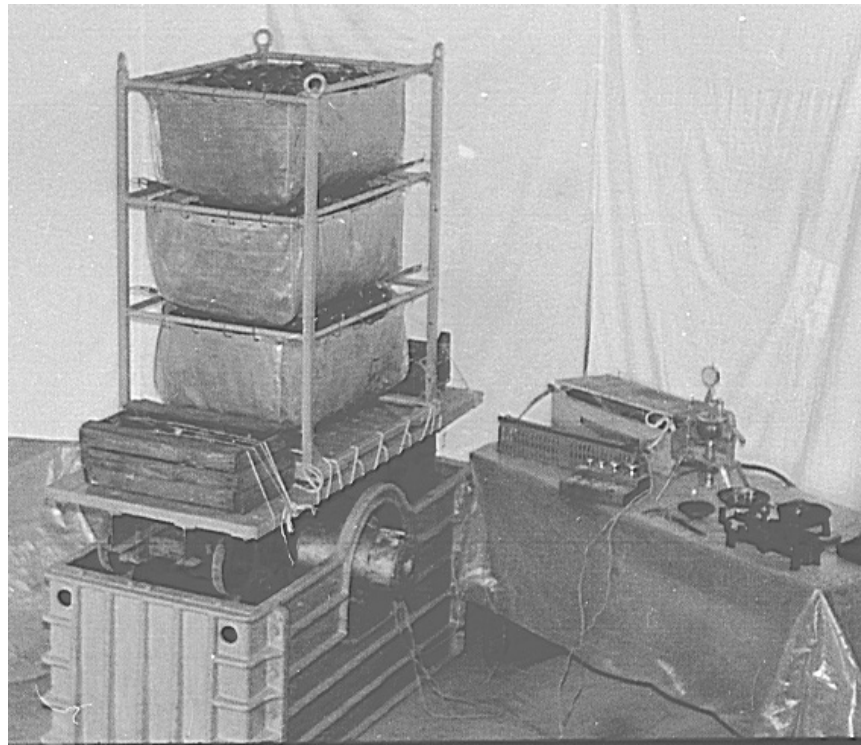
Кулачковые колеса имеют четыре выступа и впадины. У каждой пары колес, которые находятся на одном валу, впадина одного колеса размещена против выступа второго. При вращении кулачковых колес каждый угол рабочей платформы попеременно поднимается и опускается, воспринимая через приемно-дисковые колеса толчки и удары. Благодаря этому и колебаниям платформы, подвешенной на пружинах, рабочая платформа с испытуемой тарой непрерывно находится под действием сил различного направления.

Опыты проводились при колебаниях рабочей платформы вибростенда с частотой 9 Гц и амплитудой до 15 мм. Процесс колебаний записывался на индикаторную бумагу при помощи вибрографа ВР-1А.

Режим таких колебаний отвечает движению автомобиля со скоростью близкой 50 км/час по дороге плохого качества с разбитым асфальтовым, булыжным или грунтовым покрытием [106].

Для испытаний и сравнения повреждаемости плодов было взято два вида тары. Это ящик IX-2 по ГОСТ 2991-85 и многоярусный контейнер с эластичными оболочками. В качестве испытуемых плодов использовались помидоры круглой формы сортов Флора и V – 5F<sub>1</sub> а также сливовидной формы сорт Лагидный, что находятся на изучении в ИОБУААН.





Б

Рис. 4.7. Стенд имитации транспортного процесса СИТ - 4 (А — общий вид; Б — схема устройства): 1 — литая чугунная станина, 2 — балластная платформа, 3 — пружины платформы, 4 — механизм скоростей, 5 — многоярусный контейнер, 6 — механизм вибрации, 7 — платформа для испытываемой тары.

Транспортные колебания воспроизводились на стенде в течение 40 минут с определением через каждые 10 минут количества плодов, получивших повреждения. По этим данным определялись экспериментальные значения интенсивности  $\lambda(t)$  и вероятности  $P(t)$  повреждения плодов.

Интенсивность повреждения представляет собой отношение [97]:

$$\lambda(t) = \frac{m}{n\Delta t}, \quad (4.6)$$

где:  $m$  — число плодов, получивших повреждения в интервале времени  $\Delta t$ ;

$n$  — среднее число плодов, неповрежденных в данном интервале времени:

$$n = \frac{n_{i-1} + n_i}{2} \quad (4.7)$$

где  $n_{i-1}$  — число неповрежденных плодов в начале интервала времени  $\Delta t$ ;  $n_i$

— то же в конце интервала  $\Delta t$ .

4.3.3 Результаты лабораторных исследований повреждаемости плодов томатов в многоярусном контейнере с эластичными оболочками. Сравнительному исследованию повреждаемости плодов томатов в процессе транспортирования подвергались томаты трех ботанических сортов: Лагидный, Флора и V-5F1. В процессе исследований эффективности многоярусных контейнеров с эластичными оболочками предлагаемой конструкции в качестве базового варианта были приняты деревянные ящики, которые на сегодняшний день применяются наиболее широко. Процесс транспортирования имитировали с помощью соответствующего стенда СИТ-4 (рис. 4.7). Полученные результаты испытаний отвечают ужесточенным условиям транспортирования и представлены в табл. 4.10 [97].

По данным табл. 4.10 построены графики интенсивности повреждаемости в зависимости от времени, который представлен на рис. 4.8.

Как видно из табл. 4.10 и рис. 4.8 характер зависимости интенсивности повреждаемости от времени  $\lambda = \lambda(t)$  для ящиков и предлагаемых контейнеров существенно различается:

1) в начале процесса транспортировки в ящиках интенсивность повреждаемости томатов быстро нарастает до некоторых постоянных значений, а уже затем остается практически постоянной;

2) интенсивность повреждаемости плодов томатов при транспортировании в ящиках всегда выше, чем в контейнерах предлагаемой конструкции;

3) ящичная тара более требовательна к физико-механическим свойствам томатов. В результате интенсивность повреждаемости плодов томатов разных сортов существенно различается;

4) интенсивность повреждаемости плодов томатов при транспортировании в контейнерах предлагаемой конструкции остается постоянной ( $\lambda(t) = \text{const}$ ) и практически не зависит ни от сорта, ни от продолжительности процесса транспортирования.

Таблица 4.10

Результаты повреждаемости плодов томатов в многоярусных контейнерах с эластичными оболочками и ящиках

| Сорт томатов | Вид тары  | Количество плодов в пробе |     | Количество поврежденных плодов после транспортирования, шт. (%) |         |          |          |
|--------------|-----------|---------------------------|-----|---|---------|----------|----------|
|              |           | кг                        | шт. | 10 мин  | 20 мин  | 30 мин   | 40 мин   |
| Флора        | ящик      | 12,6                      | 150 | 41 (27)   | 72 (48) | 81 (54)  | 88 (59)  |
|              | контейнер | 63,2                      | 750 | 36 (5)  | 83 (11) | 128 (17) | 152 (20) |
| V-5 F1       | ящик      | 14,6                      | 176 | 47 (27)   | 71(40)  | 80(45)   | 94(53)   |
|              | контейнер | 72,2                      | 885 | 41(5)   | 96(11)  | 156(18)  | 178(20)  |
| Лагидный     | ящик      | 16,9                      | 174 | 22(13)  | 46(26)  | 75(43)   | 82(47)   |
|              | контейнер | 77,8                      | 800 | 38(5)   | 81(10)  | 123(15)  | 158(20)  |

Резкое нарастание интенсивности повреждения томатов в начальный период обусловлено быстрой повреждаемостью имеющихся в пробе плодов переспелых, с непрочной кожицей и скрытыми дефектами. Интенсивность повреждаемости плодов зависит от их прочностных свойств. Томаты “машинных” сортов характеризуются показателями интенсивности повреждае-

мости меньшими, чем томаты “немашинных” сортов. Все это весьма важно при использовании ящиков. Применение контейнеров предлагаемой конструкции, во-первых, снижает требования на качество уборки томатов и, во-вторых, в значительной мере освобождает селекционеров от работы над машинными сортами, а, значит, способствует переносу их деятельности на сорта с повышенными пищевыми показателями.

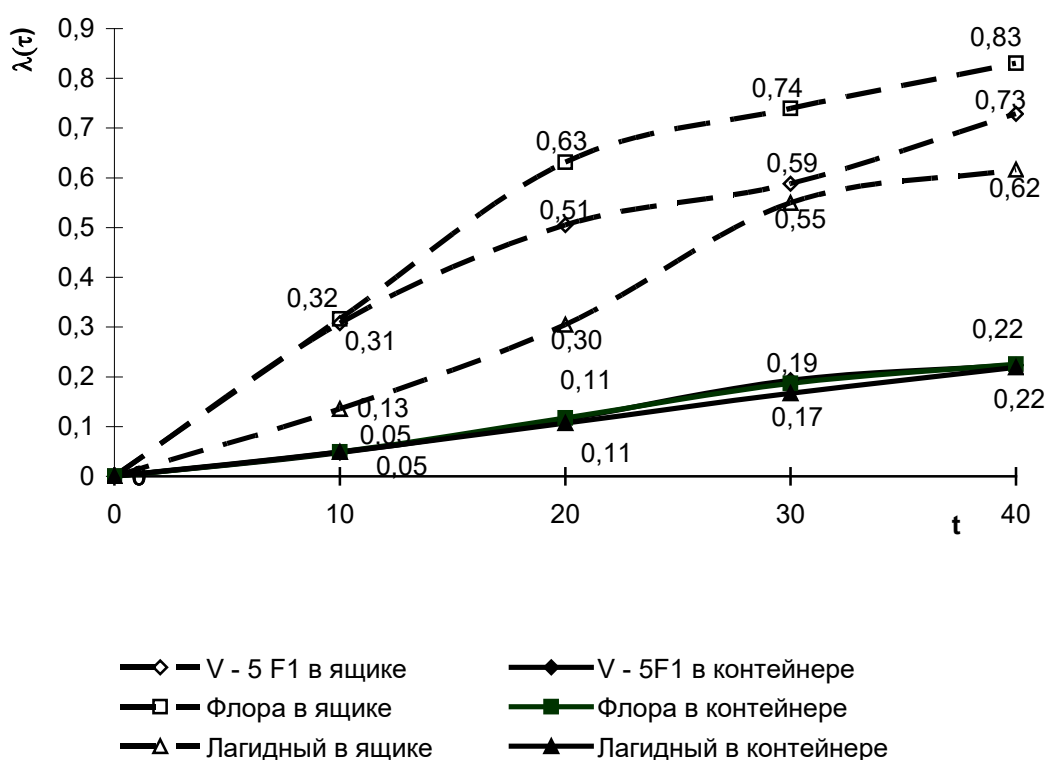


Рис. 4.8 Интенсивность повреждаемости плодов томатов в ящичной таре и многоярусных контейнерах с эластичными оболочками при испытании на стенде СИТ - 4.

Результаты сравнительных испытаний (табл. 4.10, рис. 4.8) контейнеров предлагаемой конструкции и наиболее широко применяемых ящиков демонстрируют убедительное превосходство первых над вторыми.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов исследований по оценке разрушающей нагрузки на томаты открытого и закрытого грунта при сжатии их между эластичными

и жесткими поверхностями, показал, что в первом случае стойкость плодов к сжимающим статическим нагрузкам выше в 1,13...1,4 раза. Таким образом, что бы снизить потери плодоовощной продукции при транспортировании ее в таре известной конструкции (прежде всего в различных ящиках) следует рекомендовать применение придонных эластичных вкладышей.

2. Исследования показали, что плоды томатов имеют упругие свойства, но поскольку среднее значение модуля упругости невелико (равно  $0,23 \text{ Н/мм}^2$ ), то в процессе конструирования тары для транспортирования томатов их упругостью можно пренебречь.

3. Поскольку коэффициент внешнего трения томатов может колебаться в широких пределах ( $f \in [0,27; 0,62]$ ) и поскольку чем он меньше, тем равномернее распределяются напряжения в объеме плодов при их нагружении (вытекает из теоретических исследований второй главы), то в конструкции тары следует включать элементы снижающие трение томатов о ее стенки. Как минимум, этот фактор следует учитывать при выборе материалов.

4. Экспериментальное значение плотности вещества ( $\gamma$ , в г/мл), составляющего зрелые (красные) плоды томатов в среднем по сортам составляет 0,98, но может быть как меньше (0,81 — томаты сорта Кременец) так и больше единицы (1,12 — томаты сорта Серпневый), то в расчетах удобнее всего принять, что  $\gamma = 1,0 \text{ г/мл}$ .

5. В качественном смысле законы деформирования единичного отрезка цилиндрического модельного тела, состоящего из пластической среды, и реальных плодов томатов совпадают.

6. Установлено, что для модельного тела экспериментальные значения пластической постоянной  $k$  (в  $\text{Н/мм}^2$ ) укладываются в диапазон  $k \in [0,071; 0,097]$ , со средним значением  $k = 0,084$ .

7. Несмотря на специфическую ориентацию пружинных колец вертикальной подвески оболочки секции контейнера, их жесткость имеет ярко выраженную линейную зависимость от нагрузки.

8. Через прогиб днища оболочки секции контейнера реализуется механизм боковой поддержки плодов томатов. Когда днище прогибается вниз, боковые стенки оболочки приближаются друг к другу, поджимая плоды по бокам. И то и другое пропорционально интенсивности вертикальной составляющей силовых воздействий на плоды. При полной загрузке секции контейнера в 70 кг, в статическом состоянии прогиб днища составляет 41 мм.

9. Повреждения плодов томатов, транспортируемых в контейнерах с эластичными оболочками в 2...2,5 раза меньше, чем в деревянных ящиках.

Основные научные результаты раздела опубликованы в трудах [68, 97, 98, 118]

## ГЛАВА 5

### ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

Комплексная механизация, поточная технология, рациональная организация погрузочно-разгрузочных и транспортных работ, и внедрение контейнерных средств перевозок позволяет снизить расходы трудовых ресурсов, значительно уменьшить потери сельскохозяйственной продукции и повысить производительность транспортных средств во время транспортировки овощной продукции от поставщика к потребителю за схемой „поле – хранилище – магазин” и транзитный вариант „поле – магазин” [119].

#### 5.1. Результаты производственной проверки

Производственная проверка разработанных многоярусных контейнеров с эластичными оболочками секций производилась в условиях Харьковской и Змиевской овощных фабрик. Целью опытных перевозок была проверка повреждаемости томатов в реальных производственных условиях и получение конкретных данных, характеризующих эффективность предлагаемых решений. При перевозках томатов в торговую сеть, как и в случае лабораторных испытаний, для получения сравнительных данных использовались традиционные ящики и многоярусные контейнеры предлагаемой конструкции.

В качестве транспортных средств для сравнения взяты широко используемые автомобили марки ГАЗ-52-04, ГЗСА-3702, ГЗСА-05 разной грузоподъемности. Сравнительные данные используемой транспортной тары ящиков типа IX - 1 по ГОСТ 2991 – 85 и многоярусных контейнеров с эластичными оболочками приведены в табл. 5.1.

Собранные вручную плоды томатов укладываются в ящики в местах сбора и складироваться небольшими партиями вдоль центрального проезда

теплицы, после чего вилочный погрузчик (различных моделей) с ящичным поддоном на вилах проводит сбор заполненных ящиков. Для этого рабочие укладывают ящики на поддон. Заполненный поддон транспортируется в складское отделение для кратковременного хранения. В складском помещении ящики снимаются с поддона и укладываются в штабели. При наличии транспортного средства ящики вновь погружаются на поддон, перевозятся на весы, взвешиваются и транспортируются к автомобилю, где рабочие снимают ящики с поддона и укладывают в кузове. Транспортированная по такой схеме продукция испытывает около 8 и более перегрузок с учетом её разгрузки в пунктах реализации.

Таблица 5.1

Данные о таре, в которой транспортировались томаты закрытого грунта сортов Верлиока и Красная стрела

| Показатели по транспортной единице   | Един. изм. | Вид тары    |              |
|--------------------------------------|------------|-------------|--------------|
|                                      |            | ящичная     | контейнерная |
| 1                                    | 2          | 3           | 4            |
| Габаритные размеры                   | мм         | 590x398x148 | 600x800x1200 |
| Масса транспортной единицы           | кг         | 19          | 210          |
| в том числе: груза                   | кг         | 15          | 180          |
| собственный вес                      | кг         | 4           | 30           |
| Коэффициент тары                     |            | 0,26        | 0,16         |
| Показатели на 1т продукции:          |            |             |              |
| количество тары                      | шт         | 67          | 6            |
| стоимость тары                       | грн        | 199,8       | 627,0        |
| Стоимость тары с учетом срока службы | грн/мес    | 50,3        | 10,5         |

Многоярусный контейнер, выполняя функцию тары-оборудования, исключает большинство этих трудоёмких операций. Перемещаясь при помощи собственных колес, которые имеются в данной конструкции, контейнер обеспечивает одновременно уборку и затаривание томатов и после заполнения всех секций доставляется на погрузочную площадку для погрузки вилочным погрузчиком или другими грузоподъёмными механизмами в транспортное средство (рис. 5.1).

Систему перевозки продукции овощеводства на предприятия переработки и торговли можно рассматривать как микросистему, представляющую собой работу отдельного автомобиля на маятниковом



маршруте с обратным негруженным пробегом. Особенностью такой системы является совпадение понятий ездки и оборота, так как за каждый оборот выполняется одна груженная ездка и только половину пробега за оборот транспортные средства проходят с грузом.

Производительность транспортного средства, определяемая количеством перевезённого груза  $Q$  и выполненной транспортной работы в тонно-километрах  $P$  за единицу времени равны [120]:

$$W_Q = \frac{Q}{t_{об}} = \frac{Q_n \alpha_z}{t_{об}}, \text{ т/час} \quad (5.1)$$

$$W_P = \frac{P}{t_{об}} = \frac{Q_n \alpha_z l_e}{t_{об}}, \text{ ткм/час} \quad (5.2)$$

где:  $Q_n$  — номинальная грузоподъёмность транспортного средства, т.;  $\alpha_z$  — коэффициент использования грузоподъёмности;  $t_{об}$  — время оборота транспортного средства, час;  $l_e$  — длина груженной ездки, км.

Время оборота (ездки) определяется по формуле [120]:

$$t_{об} = \frac{l_e}{\beta v_T} + t_{n-p} \quad (5.3)$$

где  $v_T$  — средняя техническая скорость движения, км/ч;  $t_{n-p}$  — время простоя транспортного средства на погрузочно-разгрузочных операциях, час;  $\beta$  — коэффициент использования пробега.

Подставляя (5.3) в (5.1 и 5.2) можно записать:

$$W_Q = \frac{Q_n \alpha_z \beta v_T}{l_e + t_{n-p} \beta v_T} \quad (5.4)$$

$$W_P = \frac{Q \alpha_z l_e \beta v_T}{l_e + t_{n-p} \beta v_T} \quad (5.5)$$

Коэффициент использования грузоподъёмности определяется отношением массы полезного груза  $Q_n$  к номинальной грузоподъёмности транспортного средства:

$$\alpha_z^c = \frac{Q_n}{Q_n} = \frac{Q_{бр} - q_m}{Q_n} \quad (5.6)$$

где  $Q_{бр}$  — вес груза брутто, т;  $q_m$  — вес тары, т.



А



Б



В

Рис. 5.1 Многоярусный контейнер в производственном участии:  
А, Б — контейнер в процессе транспортирования; В — погрузка контейнера  
в транспортное средство

Применение контейнеров позволяет увеличить коэффициент использования грузоподъемности  $\alpha_z$  и, следовательно, прямо пропорционально увеличить полезную массу перевозимой продукции  $Q_n \alpha_z$ . Это достигается за счет уменьшения коэффициента тары (табл.5.1).

Анализ выражений (5.4, 5.5) показывает, что объем перевозок и транспортная работа прямо пропорционально зависят от величины  $Q_n \alpha_z$ . Расчеты и анализ зависимостей показали, что контейнеры обеспечивают повышение коэффициента использования грузоподъемности автотранспортных средств в среднем на 10...12% (табл.5.2). При этом настолько же возрастают объем перевозок продукции и транспортная работа при этом одновременно сокращаются эксплуатационные расходы и себестоимость перевозок одной тонны груза за счет постоянной, неизменной части затрат [121].

Другим улучшаемым параметром использования транспортных средств является простой под погрузочно-разгрузочными операциями —  $t_{n-p}$  [121]. Сокращение простоя под этими операциями обеспечивается их механизированным выполнением. В результате уменьшения времени оборота согласно (5.3) имеет место рост производительности транспортных средств и соответствующее снижение эксплуатационных расходов и себестоимости перевозок.

Результаты производственных испытаний многоярусных контейнеров с эластичными оболочками и эксплуатационные показатели использования автомобилей, повреждения и потери массы томатов при перевозках в контейнерах и ящиках приведены в таблице 5.2.

## 5.2. Оценка технико-экономической эффективности контейнерных перевозок овощей

Экономический эффект от внедрения контейнерных перевозок овощной продукции достигается за счет улучшения использования транспортных средств и сокращения потерь транспортируемой продукции. Применение контейнерной системы перевозок позволяет повысить эффективность ис-

пользование автомобилей. Об этом свидетельствуют данные приведенные в табл. 5.2. Результаты расчетов по двум схемам товародвижения с применением ящичной и контейнерной тары показывают, что масса перевозимой тары уменьшаются в 1,5 раза, а производительность транспортного средства увеличивается в среднем на 25%. Надо отметить, что важным фактором, свидетельствующим об эффективном применении контейнеров с эластичными оболочками для транспортировки плодоовощной продукции является повышение полноценного выхода перевозимого сырья и уменьшение его потерь.

Таблица 5.2

Эксплуатационные показатели использования автомобилей, повреждения и потери массы томатов закрытого грунта при перевозке в многоярусных контейнерах с эластичными оболочками и ящиках

| Показатели по транспортировке                       | ед. изм. | Марка автомобиля |           |           |           |           |           |
|---|----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |          | ГАЗ-52-04        |           | ГЗСА-3702 |           | ГЗСА-3705 |           |
|   |          | ящик             | контейнер | ящик      | контейнер | ящик      | контейнер |
| Грузоподъемность                                    | кг       | 2500             |           | 1900      |           | 3000      |           |
| Количество тары                                     | шт       | 132              | 12        | 100       | 9         | 158       | 14        |
| Масса груза всего:                                  | кг       | 2508             | 2520      | 1900      | 1890      | 3000      | 2940      |
| вес: тары   | кг       | 528              | 360       | 400       | 270       | 632       | 420       |
| полезного груза                                     | кг       | 1980             | 2160      | 1500      | 1620      | 2370      | 2520      |
| Коэффициент использования полезной грузоподъемности |          | 0,79             | 0,86      | 0,78      | 0,85      | 0,79      | 0,85      |
| Время загрузки и разгрузки автомобиля               | мин      | 71,4             | 36,0      | 55,0      | 27,0      | 87,2      | 42,0      |
| Время оборота                                       | час      | 3,70             | 2,80      | 3,40      | 2,70      | 3,98      | 2,90      |
| Сменная производительность автомобиля               | т        | 5,93             | 8,6       | 4,45      | 6,46      | 7,11      | 10,2      |
|   | ткм      | 177,7            | 258       | 133,4     | 193,8     | 213,3     | 306       |
| Потеря массы овощной продукции                      | %        | 10               | 5         | 10        | 5         | 10        | 5         |
|   | кг       | 198              | 108       | 150       | 82        | 237       | 126       |

Значительный экономический выигрыш при внедрении контейнерной технологии имеют также производители сельскохозяйственной продукции, так как благодаря внедрению комплексной механизации всех процессов, сокращаются потребности хозяйств в рабочей силе и транспортных средствах.

Экономический эффект от внедрения контейнерных перевозок плодоовощной продукции определяется дополнительной прибылью от снижения количественных и качественных потерь продукции, улучшения использова-

ния транспортных средств при условии превышения дополнительной экономии над возрастающими приведенными затратами [122], то есть:  $\mathcal{E}_{\text{дон}} > (Z_1 - Z_2)$ , где  $Z_1$  — приведенные затраты по предлагаемому варианту;  $Z_2$  — приведенные затраты по базовому варианту. Тогда экономический эффект от внедрения контейнерных перевозок:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{дон}} - (Z_1 - Z_2) = \mathcal{E}_{\text{дон}} + (U_2 - U_1) - [(K_1 - K_2)E_n], \quad (5.7)$$

где:  $U_1, U_2$  — эксплуатационные расходы соответственно по предлагаемому и базовому вариантам, грн;  $K_1, K_2$  — капитальные вложения соответственно по предлагаемому и базовому вариантам, грн;  $E_n$  — нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.

Экономия от повышения сохранности (сокращения потерь) продукции:

$$\mathcal{E}_{\text{сохр}} = C_{\text{см}}(P_2 - P_1)A, \quad (5.8)$$

где:  $C_{\text{см}}$  — цена одной тонны стандартной продукции, грн/т;  $P_2$  — потери продукции в базовом варианте, %;  $P_1$  — потери продукции в предлагаемом варианте, %;  $A$  — объём производства продукции, т.

Расчетные и установленные в процессе опытных перевозок технико-экономические данные и показатели экономической эффективности контейнерных перевозок представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3.

Технико-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности контейнерных перевозок томатов защищенного грунта

| Показатели по транспортировке   | Ед. изм. | Марка автомобиля |           |           |           |           |           |
|---|----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |          | ГАЗ-52-04        |           | ГЗСА-3702 |           | ГЗСА-3705 |           |
|   |          | ящик             | контейнер | ящик      | контейнер | ящик      | контейнер |
| Затраты труда на 1т груза   | чел.ч    | 5,60             | 2,60      | 6,80      | 3,30      | 5,50      | 2,30      |
| Приведенные эксплуатационные затраты                                  | грн/т    | 6,50             | 4,60      | 7,76      | 5,79      | 5,79      | 4,01      |
| Приведенные капиталовложения  | грн/т    | 5,36             | 3,87      | 8,03      | 5,90      | 5,90      | 4,15      |
| Приведенные затраты   | грн/т    | 7,30             | 5,10      | 8,96      | 6,68      | 6,68      | 4,63      |
| Дополнительная экономия от улучшения сохранности и повышения качества | грн/т    | -                | 181,1     | -         | 181,3     | -         | 187,1     |

## ВЫВОДЫ

1. Производственная проверка и расчеты показали, что перевозка томатов в контейнерах обеспечивает повышение коэффициента использования грузоподъемности автотранспортных средств в среднем на 10...12% .

2. Применение контейнерной системы перевозки ранней овощной продукции позволяет повысить производительность транспортных средств в среднем на 25%.

3. Результаты сравнения двух схем товародвижения с применением ящичной и контейнерной транспортной тары показывают, что масса перевозимой тары уменьшается в 1,5 раза.

4. Потери перевозимой плодоовощной продукции в случае применения предлагаемых многоярусных контейнеров с эластичными оболочками уменьшаются в 1,5 ... 2 раза.

5. Экономия от повышения сохранности (сокращения потерь) томатов при перевозке в многоярусных контейнерах с эластичными оболочками составит в среднем 181 грн на тонну перевезенной продукции.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работе [119].

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Из всей плодоовощной продукции томаты являются наименее транспортабельными и поэтому разработка специальной тары для них одновременно является наиболее актуальной и сложной задачей.

2. Основные направления и тенденции применения и совершенствования конструкций контейнеров, установленные на основе анализа литературных источников и учитываемые в настоящей работе: а) переход от ящичного оборудования к контейнерному; б) расширение технологических возможностей контейнеров; в) создание секционных, многоярусных контейнеров; г) все более широкое применение каркасных конструкций контейнеров с емкостями из эластичных материалов; д) применение в конструкциях контейнеров амортизирующих приспособлений и других подобных решений.

3. Реальное напряженное состояние плода томата, находящегося в состоянии сжатия между двумя горизонтальными пластинами, элементами тары или соседними плодами является трехмерным.

4. Предложенная двумерная (плоская) модель пластичности в совокупности с применением модельного тела в виде единичного отрезка горизонтального бесконечно длинного кругового цилиндра в должной мере адекватно отражает напряженное состояние плодов томатов находящихся во взаимодействии друг с другом и фрагментами тары.

5. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что применительно к плодам томатов модельная пластическая среда характеризуется: а) удельным весом  $\gamma \in [0,81; 1,12]$ , г/мл; б) пластической постоянной  $k \in [0,071; 0,097]$ , Н/мм<sup>2</sup>; в) коэффициентом внешнего трения  $f \in [0,27; 0,62]$ . Проявлением упругих свойств томатов можно пренебречь. Среднее значение модуля упругости невелико — 0,23 Н/мм<sup>2</sup>.

6. Исследовано сопротивление районированных сортов томатов открытого и защищенного грунта сжимающим нагрузкам при нагружении жесткими и эластичными поверхностями. Установлено, что с вероятностью 95% по-

казатели разрушающей статической нагрузки при сжатии жесткими поверхностями находятся в пределах: на томаты открытого грунта от 38,5 до 44,0 Н; на томаты защищенного грунта от 42 до 49,5 Н. Величина разрушающей нагрузки на томаты при контакте с эластичными поверхностями возрастает в среднем на одну треть.

7. Коэффициента деформации плодов томатов по сравнению с воздействующей на них нагрузкой более точно отражает степень механического воздействия на них и может использоваться в качестве критерия разрушения.

8. Теоретически показано, что одиночный плод томата, находящийся в состоянии сжатия между двумя горизонтальными пластинами деформируется существенно больше, чем группа изначально контактирующих друг с другом плодов сжатых между такими же пластинами и при таких же нагрузках.

9. Что бы при транспортировании плоды томатов повреждались в меньшей степени, конструкция тары должна обеспечивать боковую поддержку для каждого из плодов. В качестве боковой поддержки плодов могут использоваться соседние такие же плоды. Сила их сжатия по горизонтали должна быть пропорциональной изменению вертикальных нагрузок, которые возникают в процессе транспортирования и являются динамическими.

10. Экспериментально подтверждено, что, защищенная двумя авторскими свидетельствами предлагаемая конструкция эластичных лотков секций контейнера закрепленных на пружинных растяжках внутри жесткого каркаса, в полной мере реализует механизм боковой поддержки для транспортируемых плодов и в конечном итоге, по сравнению с ящичной тарой, приводит к повышению сохранности плодов при транспортировании в 2...2,5 раза.

11. Кроме снижения механических воздействий на плоды предлагаемая конструкция контейнера, более удобна в обслуживании. Прежде всего такой эффект достигается за счет улучшения доступа к нижним секциям путем складывания верхних, что осуществляется смещением подвижных передних поперечин в направлении задних.



12. Производственная проверка предложенных контейнеров в условиях Змиевской овощной фабрики подтвердила их высокую эффективность. Дополнительная экономия от улучшения сохранности и повышения качества овощей составляет 181 гр/т, производительность транспортных средств при этом увеличилась на 25%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кормаков Л.Ф. Автомобильный транспорт АПК: организация и экономика. – М.: Транспорт, 1990. – 232. с.
2. Ларионов В.Г. Повысить эффективность транспортной тары // Пищевая пром-ть. – 1988. – №4. – С.21.
3. Van Petegem L. Recipients en plastique pour l'emballage des fruits. // Fruit belge.– 1983. – №361. – Р. 25 – 28.
4. Бублевский И.М., Ускова Е.А., Воронина Т.А. Проблемы повышения эффективности полимерной транспортной тары // Пищевая пром-ть. – 1988. – №4. – С.19 – 20.
5. ГОСТ 9078 – 74 – Поддоны плоские.
6. ГОСТ 21133 – 75 – Поддоны ящичные специализированные для картофеля, овощей, фруктов и бахчевых культур.
7. Макаров В.В., Павлов Г.М., Зайцев В.Н. Средства механизации погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ. – М.: ЦНИИТЭИмясомолпрома, 1977. вып. – 16 с.
8. Шкодин В.С. Применение тары-оборудования в плодоовощной торговле в Москве // Индустриальная система товародвижения. – М.: 1978. – С 89 – 92.
9. Новые конструкции контейнеров. – М.: ЦНИИТЭИПищепром, 1982. – С. 12 –14.
10. Контейнер для хранения и транспортирования ящичков. – М.: ЦНИИТЭИМС. Сер.5, 1984. вып.7. – С.4.
11. А. с № 631388 СССР, МКИ В65Д 19/04. Ящичный поддон/ Каверин В.А. (СССР). - № 2498428/28-13; Заявлено 20.06.77. Оpubл. 05.11.78. Бюл. №41 – 2с.
12. А. с № 438586 СССР, МКИ В65Д 21/02. Ящичный поддон/ Каверин В.А. (СССР). - № 1839796/28-13; Заявлено 02.01.74. Оpubл.05.08.74. Бюл. №29 – 4с.
13. А.с. №625974 СССР, МКИ В65D 7/28. Многоярусный контейнер/ И.В.Навалинскас, В. – Ю. И. Кучинскас, М.И. Пирмайтис М.И. (Министерство торговли Литовской ССР). - №2495521/28 – 13; Заявлено 07.06.77; Оpubл. 30.09.78. Бюл.№36 – 3с.

- 14.Новикова Т.Я., Шилова Е.П. Перевозка сельскохозяйственных грузов за рубежом – М.: Информагротех, 1990. – 44 с.
- 15.Павлов А.Н., Хрунов В.П. Контейнеры для картофеля и овощей // Картофель и овощи. – 1976. – №10. – С. 8 – 9.
- 16.Буряков А.Т., Пестрякова С.В., Реутов А.В. Контейнерные перевозки в сельском хозяйстве. – М.: ЦНИИТЭИСХ, 1978. – 48 с.
- 17.Демидко М.Е., Фрышев С.Г. Контейнеры разгружаем в воде // Садоводство. – 1971. – №8. – С. 19 – 20.
- 18.Каверин В.А. Бестарная и контейнерная перевозка сырья. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 176 с.
- 19.O`Bzien M. Damage Losses in handling Processing Tomatoes in Bulk// Trans.ASAE. – 1974. v.17, №3, - P. 583 – 586.
- 20.Гараничев Б., Дисански С. Транспортиране на домати за переработка в насипно състояние в гондоли. – Гранидарство. 1975. – №6. – С. 29 – 32.
- 21.Каюмов А.К., Бояджиев Ф.С. Использование контейнеров для транспортирования томатов //Консервная и овощесушительная промышленность. – 1976. – №4. – С. 11 – 12.
- 22.Руденко Н.Е., Потапов В.А. Контейнер для транспортирования томатов // Консервная и овощесушительная промышленность. – 1976. – №8. – С. 14 – 16.
- 23.Тигинян Г.Д. Механизация транспортирования сырья на заводе «Октябрь»//Консервная и овощесушительная пром-ть. – 1971. – №5. – С.5.
- 24.Лазаретов В.Ф., Люрье Г.С. Контейнерные перевозки в СССР и за рубежом: Обзор / Под ред. В.Н. Афанасенко. – Минск, 1966. – 51с.
- 25.Кунибный А.А. Контейнерные перевозки сыпучих пищевых продуктов. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1974. – 28 с.
- 26.Transport behalter fur Landwistschftliche Erzeugnisse. Pat. BRD. B65D №1271031.
- 27.Wautersen A.P. Afmeting. Constructie en Materials Van Stapelnisten. Institut voor Tuiabouwtechniek. 1976. – 148 с.

28. Palette en treillis doublee. Pat. Trans.Int. Cl. B65D 19/00, №2060680.
29. Христов Б., Бонев П., Кунчев Ш. Палетизация при бране и транспортировке на дини // Мех. селск. стоп., 1982, 32, 8. – С. 12 – 13.
30. Blackburn A.G. Containers. Brit pat B 8 P (B65D) 7/16) № 1449166.
31. Контейнер для хранения плодов и овощей. А. с. СССР А 01 25/14 №1130249.
32. Таура М. Контейнер для фруктов. Яп. пат. кл. 132 с.5 (B65D 25/22) №53-48.
33. Физико- механические свойства сельскохозяйственных растений / М.Ф. Бурмистрова, Т.К. Комолькова, Н.В.Клемм, И.П. Панина, И.Г. Тетянюк, В.М. Чаус, Э.Г. Эглит / - М.: 1956. – С. – 343.
34. Физико- механические свойства сельскохозяйственных растений, почв, и удобрений/ Воронюк Б.А., Пьянков А.И., Мальцева Л.В. и др. / - М.: Колос, 1970. – С. – 423.
35. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. – М.: Машиностр. 1977. – 155 с.
36. Якубовский Э.Я., Яшкин Е.И. Влияние механических воздействий на лежкость плодов. – Тр. ВИСХОМ, вып. 71, 1972. – С. 248 – 251.
37. Четвертаков А.В., Брутенко И.М., Бранд С.Б. Машины для товарной обработки плодов. – М.: Машиностр, 1977. – 155 с.
38. Кенигсберг Э. Исследование физико-механических свойств плодов // Мех. и электр. сел. х-ва. – 1984. – №1. – С. 23 – 25.
39. Хайліс Г.А., Горбовий А.Я., Гошко З. О. та ін. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. – Луцьк: ЛДТУ, 1998. – 269 с.
40. Царенко О.М., Яцун С.С., Довжик М.Я., Олійник Г.М. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / за ред.. С.С.Яцуна. – К.: Аграрна освіта, 2000. – 243 с.
41. Rezrucek K. Physikalische Eigenschaften landwirtschaftlichtr Stoffe unter dem Aspekt der Landtechnik // Tag. Ber Akad. Landwirtsch., Berlin, 1981. – P. 169 – 175.

42. Гахонидзе И.Х. Подбор томатов для консервирования // Консервная и овощесуш. Пр – ть. – 1972. – №2. – С. 17 – 18.
43. Тюма Ю., Ивамото М., Сига Т. Механические свойства мандаринов, учитываемые при конструировании контейнера для их транспортировки навалом/ Пер. с японск. В.И.Перова НЦ – 8267. – М.: ВЦП, 1973. – 19 с.
44. Четвертаков А.В., Пустовалов В.С. Устройство для измерения параметров вибрации плодов в таре. А. с. СССР, кл. G01 N 33/02 №391402.
45. Yakowski S. Sily i przeciazenia oddziakuyace podczas transportu na ladenki w konteinerach // Opackowanie, 1974. t.20, №4. – S.14, 18 – 20.
46. Кода К Измерение динамических воздействий на грузы: Пер. с японск.Е.Н. Рабиновича, - М.: ВЦП, 1973. – 32 с.
47. М. O'Brien, R. Guillon. An In – transit Vibration Simulator for Fruit // ASAE. – 1989. V.32, №1. – P.594 – 597.
48. Penzkofer U.A. Untersuchungen uber mechanische Transport-deanspruchungen an Packstucken.// Verpackungs – Rundschau. – 1985. – №7. – S. 55 – 57.
49. Заводнов В.С. Применение статистической динамики при исследовании плавности хода сельскохозяйственных транспортных средств: Сб.тр. Кишинев. СХИ. – 1970. – С. 13 –22.
50. Каверин В.А. Оптимизация систем транспортирования и первичной переработки плодов и овощей. – А.р. М.: МИИСП. – 1986. – 32 с.
51. Кеванишвили В.Н. Потери массы томатов при перевозках // Консервн. и овощн. пром – ть. – 1973. – №4. – С. 21 – 22.
52. Генчев Е., Димитров Д., Параскова П. Механичи увреждания при транспорт на ябълки // Конс. пр – ть. – 1982. – №3. – С. 27 – 29.
53. Занозин В.А Проблемы доставки скоропортящихся овощей // Пром. Трансп. – 1985. вып.1. – 22с.
54. Короленко А.С., Китабова Л.С. Эффективность снижения потерь томатов за счет соблюдения сроков их хранения на сырьевых площадках. – М.: ЦНИИТЭИПищепром. – 1985. вып.6. – С.17.

- 55.Букина Н., Тойбаев М. Овощи в контейнерах // Сель. х – во Казахстана. – 1984. – №7. – С.37.
- 56.O'Brien M. Damage Losses in Handling Processing Tomatoes in Bulk.//Trans. ASAE. – 1974. v.17, №3 – P. 583 – 586.
- 57.Херольд Б., Реттид Х., Зириг Г. Оценка качества работы средств механизации // Междунар. с. – х. Журнал. – 1978. – №3. – С. 90 – 93.
- 58.Каверин В.А. О причинах механических повреждений плодов и овощей при транспортировке // Конс. и овощесуш. Пр – ть. – 1976. – №9. – С. 17 – 19.
- 59.Гусева Л.И. Требования к сортам томатов для машинной уборки // Конс. и овощесуш. пр – ть. – 1976. – №2. – С. 10 – 12.
- 60.Результаты государственного сортоиспытания помидоров. – М.: Колос, 1983. – 76 с.
- 61.Гавриш С.Ф. Свойства сортов томатов, пригодных для машинной уборки // Вестник с. х. Наук. – 1976. – №10. – с. 116 – 118.
- 62.Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайко В.М., Довжик М.Я., Яцун С.С. Механіко –технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів /За ред. С.С. Яцуна. – К.: «Мета», 2003. – 448 с.
- 63.Моқан М.Д., Кужеленко В.Г., Фрей О.Э. Физико–механические свойства яблок // Садоводство, виноградарство и виноделие Молдавии. – 1975. – №11. – С. 10 – 12.
- 64.Широков Е.П. Технология хранения и переработки плодов и овощей. – М.: Колос, 1984. – 320 с.
- 65.Левачев Н.А., Каверин В.А. Исследование физико – механических свойств томатов // Конс. и овощесуш. пр – ть. – 1971. – №11. – С. 26 – 28.
- 66.Нетесов В.П. Определение некоторых физических свойств томатов // Конс. и овощесуш. пр – ть. – 1975. – №8. – С. 36 – 38.
- 67.Finney E.E., Hall C.W. Der Einfluss der Belastungsflach bti mechanischer zerstörung des Kartoffelgewebes // Landtechnische Forschung. – 1964. – №6. – P. 19 – 22.

- 68.Гринченко А. С., Цыганенко М.А. Методика и результаты экспериментальной оценки модуля упругости томатов // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Випуск 7 / Харків: Видавництво ТОВ «Славена», 2001. С. 265-270.
- 69.Каверин В.А. Приборы и исследования при испытаниях контейнеров. – М.: ЦНИИТЭИПищепром, 1974. – 25 С.
- 70.Беков Р.Х., Квасников Б.В., Зайцев А.И. Приборы для определения устойчивости плодов томатов // Вестник с.х. науки. – 1976. – №2. – С. 92 – 97.
- 71.Мамедов Р.М., Мамедов Ю.Д. Физико-механические свойства деревьев и плодов яблонь. – Труды Азербайджанского НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства, 1978, вып. VI, С.36 – 39.
- 72.Fletscher S.W., Mohsenin N.N Mechanical Beha – Vior of Selectedand Vegetables Under Fast Rates of Loading // Trans.ASAE, 1965. – S. 324 – 326.
- 73.Мельник В.И., Цыганенко М.А. Плоды томатов как пластическое тело. //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка „Механізація сільськогосподарського виробництва”. Випуск присвячений 75- річчю університету. /Харків, 2005. – С. 283 – 299
- 74.Мельник В.І., Циганенко М.О., Леонтьев С.М. Визначення взаємодії плодів томатів з жорстким плоским деформатором. //Тези доповіді на міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» Харків, 2005.
- 75.Мельник В.И., Цыганенко М.А. Математическое моделирование статического напряженного состояния плодов томатов. // X международная научно-производственная конференция „Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения”: Материалы конференции. Том II (Ветеринария. Животноводство. Механизация ) /Белгород: Издательство Белгородской ГСХА, 2006. С. 206.

76. Мельник В.И., Цыганенко М.А. Алгоритм расчета напряженного состояния плода томата, сжатого между двумя жесткими горизонтальными плоскостями. //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка „Механізація сільськогосподарського виробництва”. Випуск 44 том 2. /Харків, 2006. – С. 236 – 251
77. Мельник В.И., Цыганенко М.А. Взаимодействие плодов томатов между собой и жестким плоским деформатором одновременно. //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка „Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва”. Випуск 51. /Харків, 2007. – С. 349 – 362
78. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования материалов. -М.: Металлургия, 1972. -408 с.
79. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. -4-е изд.-М.:Наука, 1990. -272 с.
80. Мельник В.И. Технологические задачи повышения вибротермостойкости кристаллических сцинтилляционных детекторов: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.27.06/ Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники. Харьков, 2000. – 20 с.
81. Мельник В.И. Преобразование независимых переменных по характеристическому решению гиперболических квазилинейных систем двух уравнений // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. -Харків: НТУ "ХПІ", -2001. -№ 25. С. 118-125.
82. Мельник В.И. Соотношения на декартовых координатах для условий предельного равновесия идеально связной среды //Вібрації в техніці та технологіях. -2002. -№3(24). С. 72-81.
83. Мельник В.И. Уплотнение идеально-связной среды между параллельными вертикальными стенками — вывод основных уравнений //Вібрації в техніці та технологіях. -2003. -№ 6(32). С. 68-76.



84. Мельник В.И. Уплотнение идеально-вязкой среды между параллельными вертикальными стенками — анализ граничных условий и алгоритм расчета // Вібрації в техніці та технологіях. -2004. -№ 4(36). С. 81-90.
85. Мельник В.И. Уплотнение идеально-вязкой среды между параллельными вертикальными стенками — построение сетки линий скольжения // Вібрації в техніці та технологіях. -2006. -№ 1(43). С. 79-86.
86. Мельник В.И. К вопросу о знаках касательных напряжений // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Випуск 41 / Харків: Видавництво СПДФО Червяк В.К., 2005. С. 259-264.
87. Мельник В.И. Предельное равновесие сплошных неупругих сред -Харьков: Типография є!3, 2006. -367 с.
88. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. -9-е изд., перераб.-М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. -512 с.
89. Можаровский Н.С. Теория пластичности и ползучести в инженерном деле // Приложение методов теории пластичности и ползучести к решению инженерных задач машиностроения: в 2 ч., -К.: Выща шк., 1991. -Ч. 1. -264 с.
90. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В трех томах. Т. 2. -СПб.: Изд-во "Лань", 1997. -800 с.
91. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. -М.: Наука, Гл.ред. физ.-мат. лит., 1981. -800 с.
92. Брычков Ю.А., Маричев О.И., Прудников А.П. Таблицы неопределенных интегралов: Справочник. -М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. -192 с.
93. ГОСТ–21140–88 (СТ СЭВ 227 – 87) – Тара система размеров.
94. Мельник В.И., Цыганенко М.А. Обоснование размеров секции контейнера для перевозки томатов. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка „Механізація сільськогосподарського виробництва”. Вип. 59 том 2. /Харків, 2007. – С. 75 – 80

95. Беренштейн И.Б., Баженов В.М. Определение оптимальной высоты наполнения контейнеров плодами // Садоводство, виноградарство и виноделие Молдавии. – 1975. – №1. – С. 42 – 44.
96. Тюма Ю., Ивабото М., Сига М. Проектирование контейнера для навалочного транспортирования цитрусовых: Пер. с японск. – М.: ВЦП, 1973. – 18 с.
97. М.О.Циганенко, В.І.Мельник Зменшення рівня механічного впливу на томати при транспортуванні // Вісник аграрної науки. – 1999. – №11. – С.49 – 52.
98. Цыганенко М.А. Оценка стойкости томатов в зависимости от вида контактной поверхности в транспортируемой таре. //Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства „Механізація сільськогосподарського виробництва”. Випуск 1./Харків, 2000. – С. 148 – 155.
99. Яценко Н.Н., Прутчиков О.К. Плавность хода грузовых автомобилей: М.: Машиностр., 1969. – 220 с.
100. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – М.: Машиностр., 1976. – 320 с.
101. Каверин В.А., Цыганенко М.А. Механические воздействия на плоды при транспортировании // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1993. – № 1. – С. 23 – 25.
102. Каверін В.А., Циганенко М.О. Механічні дії на плоди під час транспортування // Вісник аграрної науки. – 1994. – №12. – С.65 – 70.
103. O'Brien M. , Gentry Y.P. Vibrations Charactery // Trans. ASAE, 1975, v.8, №2 – P. 712 – 743.
104. Chesson Y., O'Brien M. Analysis of Mechanical Vibrations of Fruit During Transportation // ASAE, Michigan, 1969. – 12p.
105. Stout B.A. Yandling Tomatoes in Pallet Boxes // Marketing Research Report. – 1970. – №802. – 14s.
106. Колебания автомобиля. Испытания и исследования./ Под ред. Я.М. Певзнера. – М.: Машиностр.,1979. – 208 с.

107. Силаев А.А. Колебания механических систем. - М.: 1976. – С. – 83.
108. Успенский И.Н., Мельников А.А. Проектирование подвески автомобиля. – М.: Машиностр., 1976. – 168с.
109. Цымбалин В.Б., Успенский И.Н., Коняшов В.В. и др. Шасси автомобиля. Атлас конструкций. Учебное пособие для вузов. М.: Машиностр., 1977. – 108с. с ил.
110. Гринченко А.С., Цыганенко М.А. Оценка виброизолирующих характеристик многоярусных контейнеров для плодоовощной продукции. //Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства „Механізація сільськогосподарського виробництва”. Випуск 12./Харків, 2002. – С. 97 – 101
111. Каверин В.А., Попов Е.А. Многоярусный контейнер для плодов. Авт. св. №1568434.
112. Авт. св. №1717496, МКИ В 65 D 85/34. Многоярусный контейнер для плодов/ Каверин В.А., Цыганенко М.А. (СССР). - №4776804/13; Заявлено 02.01.90.; Опубл.07.03.92., Бюл. №9, - 4 с.
113. Каверін В.А., Циганенко М.О. М'який багатоярусний плодоовочевий контейнер // Техніка АПК. – 1995. – №1. – С. 14.
114. Каверін В.А., Циганенко М.О. Оригінальний контейнер // Земля і люди України. – 1994. – №1. – С.18.
115. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных. – М.: Колосс., 1973. – 200с.
116. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Матвеев В.В.; Отв. Ред. Писаренко Г.С. – Киев: Наук.думка, 1988. – 736с.
117. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.:Наука, 1971. – 192 с.
118. Цыганенко М.А., Гринченко А.С. Математическая модель взаимодействия виброизолирующей оболочки многоярусного контейнера с плодами томатов // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. - №4. – С. 78 – 80.

119. Циганенко М.О. Вплив контейнерних перевезень плодоовочевої продукції на техніко – експлуатаційні показники транспортних засобів. //Тракторная энергетика в растениеводстве. Сб.науч.тр. ХГТУСХ. /Харьков, 2000. – С. 70 – 74
120. Николин В.И. Автотранспортный процесс и оптимизация его элементов. – М.: Транспорт, 1990. – 160 с.
121. Миронюк С.К. Использование транспорта в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1982. – 288 с.
122. Котелянець В.І. Економіка транспорту в сільському господарстві. – К.: Урожай, 1973. – 202 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Чтобы интегрировать (2.39), прибегнем к ряду тригонометрических преобразований:

$$\sin^2 \varphi = \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi}, \quad \cos 2\varphi = \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi, \quad \cos^2 \varphi = \frac{\operatorname{ctg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi} \quad (\text{A.1})$$

и заменим

$$u = \operatorname{ctg} \varphi \quad du = -\frac{1}{\sin^2 \varphi} d\varphi, \quad (\text{A.2})$$

где  $u$  — рабочая переменная, не имеющая отношения к одноименным индексам. В результате после формальных преобразований получаем промежуточное выражение

$$I_u = 2\pi C^u \int_0^{L_u} \left[ k \frac{1}{1+u^2} - k \frac{u^2}{1+u^2} - k \ln(1+u^2) + C_y^+ \right] (C^u u + C_y^*) du, \quad (\text{A.3})$$

которое после раскрытия скобок преобразуется в сумму

$$I_u = 2\pi C^u \left[ k C^u (I_{u1} - I_{u2} - I_{u3}) + \frac{1}{2} C_y^+ C^u u^2 \Big|_0^{L_u} + k C_y^* (I_{u4} - I_{u5} - I_{u6}) + C_y^+ C_y^* u \Big|_0^{L_u} \right] \quad (\text{A.4})$$

табличных [91,92] интегралов

$$I_{u1} = \int_0^{L_u} \frac{u}{1+u^2} du, \quad I_{u2} = \int_0^{L_u} \frac{u^3}{1+u^2} du, \quad I_{u3} = \int_0^{L_u} \ln(1+u^2) u du, \quad (\text{A.5})$$

$$I_{u4} = \int_0^{L_u} \frac{1}{1+u^2} du, \quad I_{u5} = \int_0^{L_u} \frac{u^2}{1+u^2} du, \quad I_{u6} = \int_0^{L_u} \ln(1+u^2) du.$$

После интегрирования  $I_{ui}$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) (A.5) получаем

$$I_{u1} = \frac{1}{2} \ln(1+u^2) \Big|_0^{L_u}, \quad I_{u2} = \left[ \frac{u^2}{2} - \frac{1}{2} \ln(1+u^2) \right] \Big|_0^{L_u},$$

$$I_{u3} = \frac{1}{2} \left[ (1+u^2) \ln(1+u^2) - u^2 \right] \Big|_0^{L_u}, \quad I_{u4} = \operatorname{arctg} u \Big|_0^{L_u}, \quad (\text{A.6})$$

$$I_{u5} = (u - \operatorname{arctg} u) \Big|_0^{L_u}, \quad I_{u6} = \left[ u \ln(1+u^2) - 2u + 2 \operatorname{arctg} u \right] \Big|_0^{L_u}.$$

Далее сгруппируем полученные выражения  $I_{ui}$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) (A.6) в соответствии с круглыми скобками в (A.4):

$$I_{u1} - I_{u2} - I_{u3} = \frac{1-u^2}{2} \ln(1+u^2) \Big|_0^{L_u}, \quad (\text{A.7})$$

$$I_{u4} - I_{u5} - I_{u6} = u[1 - \ln(1+u^2)] \Big|_0^{L_u}.$$

Теперь, памятуя о том, что  $\varphi|_0 = \frac{1}{2}\pi$  и  $\varphi|_{L_u} = \varphi^{lu} \in ]0, \frac{1}{2}\pi[$ , а также учитывая направление интегрирования, перепишем выражения (A.7) в виде явных разностей и затем упростим их. В результате имеем

$$I_{u1} - I_{u2} - I_{u3} = \frac{\cos 2\varphi^{lu}}{2 \sin^2 \varphi^{lu}} \ln(\sin^2 \varphi^{lu}), \quad (\text{A.8})$$

$$I_{u4} - I_{u5} - I_{u6} = \text{ctg } \varphi^{lu} [1 + \ln(\sin^2 \varphi^{lu})].$$

Затем применим интервалы интегрирования к выражению (A.4), перегруппируем его и подставим суммы (A.8). В результате получаем

$$I_u = \frac{\pi k (C^u)^2}{\sin^2 \varphi^{lu}} \left[ \left( \cos 2\varphi^{lu} + \frac{C^*}{C^u} \sin 2\varphi^{lu} \right) \ln(\sin^2 \varphi^{lu}) + \frac{C^*}{C^u} \left( 1 + \frac{C^+}{k} \right) \sin 2\varphi^{lu} + \frac{C^+}{k} \cos^2 \varphi^{lu} \right] \quad (\text{A.9})$$

и, затем, поскольку из (2.34) следует, что  $\varphi^{lu} = \frac{1}{2}\pi - \Delta_{\varphi^u}$ , выполним соответствующую замену.

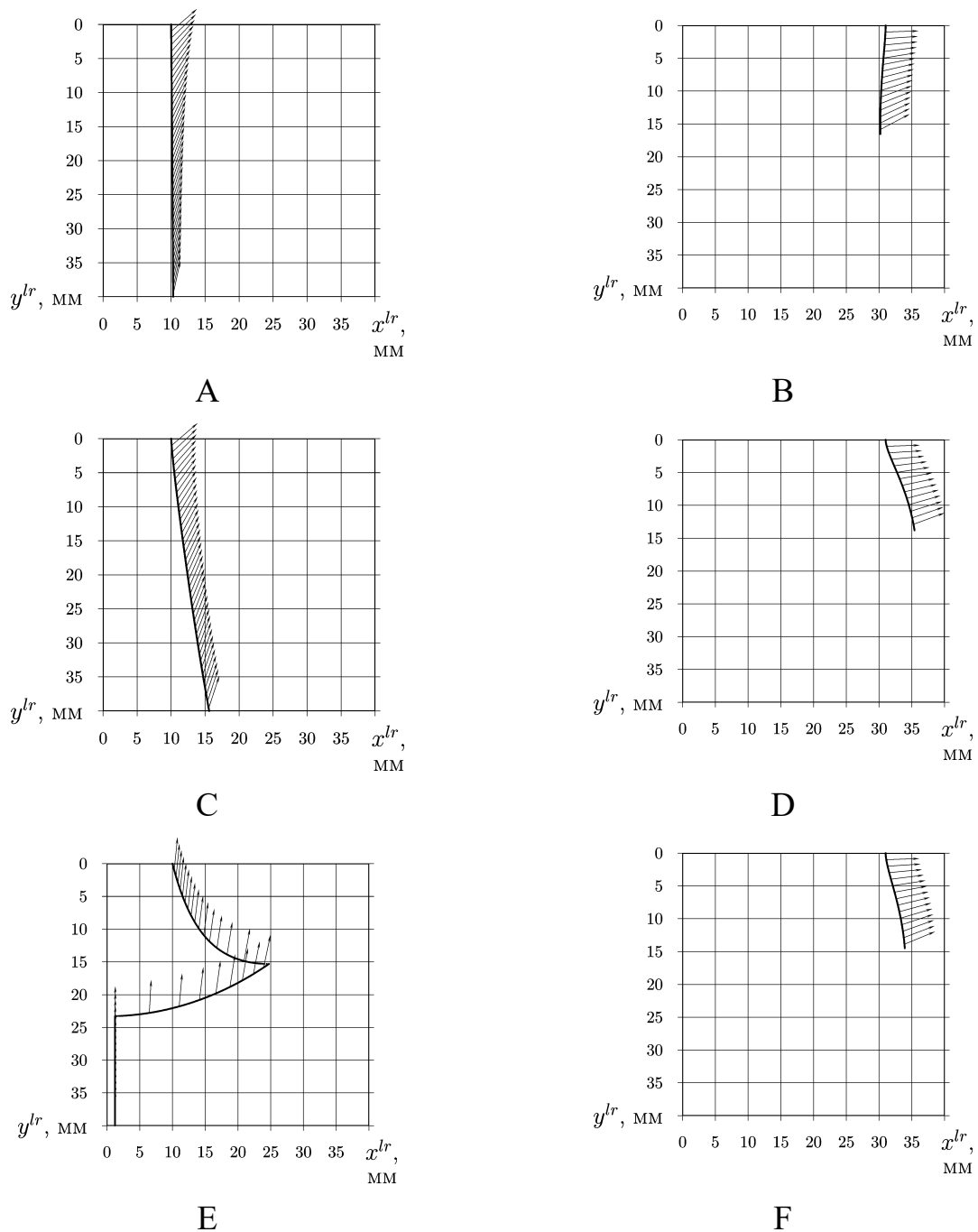


Рис.Б.1. Четверть свободного контура (сплошная линия) и расчетное положение нормали к нему (стрелка) для нагруженного плода томата как изначально сферического модельного тела ( $I_{u0} = 63,9$  Н,  $\gamma = 0,000009$  Н/мм<sup>3</sup>,  $d = 20$  мм,  $D_0 = 57$  мм,  $D = 62$  мм,  $f = 0,51$ ,  $x^u = x^c = 0$ ,  $y^u = y^c = 0$ ), когда расчет выполняется в соответствии с алгоритмом по рис.2.15 первый раз с вызовом подпрограммы *AccountSphereLURU* (А, С, Е), а второй — с вызовом *AccountSphereLCRC* (В, D, F) при трех значениях пластической постоянной: А, В —  $k = 0,005$  Н/мм<sup>2</sup>; С, D —  $k = 0,05$  Н/мм<sup>2</sup>; Е, F —  $k = 0,5$  Н/мм<sup>2</sup>.



Определение предела отношения  $I_s/I_c$ ,  
рассматриваемого как функция пластической постоянной  $\Delta_{\varphi^{lr}}$ ,

если  $\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{I_s}{I_c} &= \frac{\pi}{4} \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} (x^l - x^r) \frac{C_y^+ + k(1 - \operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) + C_y^+ + k} = \\ &= \frac{1}{4} \pi D (L_1 + L_2 - L_3), \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

где

$$L_1 = \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{C_y^+}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) + C_y^+ + k} = 0 \quad (\text{B.2})$$

$$\begin{aligned} L_2 &= \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) + C_y^+ + k} = \\ &= \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{1}{\frac{C_y^+}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})} + \frac{k}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})}} = 1 \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} L_3 &= \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{k \operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}} \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}}) + C_y^+ + k} = \\ &= \lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{\operatorname{ctg}^2 \Delta_{\varphi^{lr}}}{\frac{C_y^+}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})} + \frac{k}{k \ln(\cos^2 \Delta_{\varphi^{lr}})}} = 0 \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

Из выражений ((B.1)-(B.4)) следует

$$\lim_{\Delta_{\varphi^{lr}} \rightarrow \frac{1}{2}\pi} \frac{I_s}{I_c} = \frac{1}{4} \pi D \quad (\text{B.5})$$

## Приложение Г

Таблица Г.1. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта по сортам при нагружении жесткими поверхностями при определении количества опытов

| $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|---------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------|----------|---------------------|-----------------------|
| “Атласный”    |          |                     |                       | “Барвинок”    |          |                     |                       |
| 1             | 80,2     | 22,16               | 491,0656              | 1             | 38,3     | -0,88               | 0,7744                |
| 2             | 62,6     | 4,56                | 20,7936               | 2             | 32,2     | -6,98               | 48,7204               |
| 3             | 29,1     | -28,94              | 837,5236              | 3             | 23,6     | -15,58              | 242,7364              |
| 4             | 47,7     | -10,34              | 106,9156              | 4             | 41,6     | 2,42                | 5,8564                |
| 5             | 61,6     | 3,56                | 12,6736               | 5             | 31,6     | -7,58               | 57,4564               |
| 6             | 70,6     | 12,56               | 157,7536              | 6             | 50       | 10,82               | 117,0724              |
| 7             | 68,2     | 10,16               | 103,2256              | 7             | 34,1     | -5,08               | 25,8064               |
| 8             | 58,8     | 0,76                | 0,5776                | 8             | 47,6     | 8,42                | 70,8964               |
| 9             | 50,1     | -7,94               | 63,0436               | 9             | 37,4     | -1,78               | 3,1684                |
| 10            | 51,5     | -6,54               | 42,7716               | 10            | 55,4     | 16,22               | 263,0884              |
| Ср.знач       | 58,04    |                     |                       | Ср.знач       | 39,18    |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 14,28419              | Дисперсия     |          | S                   | 9,635444              |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,246109              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,245928              |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 93                    | Кол-во изм.   |          | n                   | 92                    |
| “Кременец”    |          |                     |                       | “Лагидный”    |          |                     |                       |
| 1             | 30,1     | -20,04              | 401,6016              | 1             | 31,3     | 0,06                | 0,0036                |
| 2             | 58,3     | 8,16                | 66,5856               | 2             | 38,5     | 7,26                | 52,7076               |
| 3             | 32,9     | -17,24              | 297,2176              | 3             | 21,2     | -10,04              | 100,8016              |
| 4             | 44,1     | -6,04               | 36,4816               | 4             | 31,4     | 0,16                | 0,0256                |
| 5             | 55,4     | 5,26                | 27,6676               | 5             | 47,5     | 16,26               | 264,3876              |
| 6             | 65,3     | 15,16               | 229,8256              | 6             | 26,8     | -4,44               | 19,7136               |
| 7             | 55,2     | 5,06                | 25,6036               | 7             | 25,4     | -5,84               | 34,1056               |
| 8             | 51,9     | 1,76                | 3,0976                | 8             | 26,5     | -4,74               | 22,4676               |
| 9             | 54,6     | 4,46                | 19,8916               | 9             | 38,4     | 7,16                | 51,2656               |
| 10            | 53,6     | 3,46                | 11,9716               | 10            | 25,4     | -5,84               | 34,1056               |
| Ср.знач       | 50,14    |                     |                       | Ср.знач       | 31,24    |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 11,15519              | Дисперсия     |          | S                   | 8,02485               |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,222481              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,256877              |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 76                    | Кол-во изм.   |          | n                   | 101,3967              |

Продолжение табл. Г.1.

| $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|---------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------|----------|---------------------|-----------------------|
| “Серпневый”   |          |                     |                       | “Флора”       |          |                     |                       |
| 1             | 33,1     | -0,46               | 0,2116                | 1             | 28,8     | -1,94               | 3,7636                |
| 2             | 26,8     | -6,76               | 45,6976               | 2             | 40,9     | 10,16               | 103,2256              |
| 3             | 21,6     | -11,96              | 143,0416              | 3             | 26,4     | -4,34               | 18,8356               |
| 4             | 42,5     | 8,94                | 79,9236               | 4             | 21,5     | -9,24               | 85,3776               |
| 5             | 40,5     | 6,94                | 48,1636               | 5             | 34,8     | 4,06                | 16,4836               |
| 6             | 33,9     | 0,34                | 0,1156                | 6             | 38,8     | 8,06                | 64,9636               |
| 7             | 26,4     | -7,16               | 51,2656               | 7             | 22,7     | -8,04               | 64,6416               |
| 8             | 45,8     | 12,24               | 149,8176              | 8             | 31,6     | 0,86                | 0,7396                |
| 9             | 27,7     | -5,86               | 34,3396               | 9             | 22,6     | -8,14               | 66,2596               |
| 10            | 37,3     | 3,74                | 13,9876               | 10            | 39,3     | 8,56                | 73,2736               |
| Ср.знач       | 33,56    |                     |                       | Ср.знач       | 30,74    |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 7,934202              | Дисперсия     |          | S                   | 7,435381              |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,236418              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,24188               |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 85,88844              | Кол-во изм.   |          | n                   | 89,90231              |
| “V – 5F1”     |          |                     |                       |               |          |                     |                       |
| 1             | 30       | -12,11              | 146,6521              |               |          |                     |                       |
| 2             | 44,9     | 2,79                | 7,7841                |               |          |                     |                       |
| 3             | 41,4     | -0,71               | 0,5041                |               |          |                     |                       |
| 4             | 43,8     | 1,69                | 2,8561                |               |          |                     |                       |
| 5             | 37,1     | -5,01               | 25,1001               |               |          |                     |                       |
| 6             | 39,5     | -2,61               | 6,8121                |               |          |                     |                       |
| 7             | 37,8     | -4,31               | 18,5761               |               |          |                     |                       |
| 8             | 43,9     | 1,79                | 3,2041                |               |          |                     |                       |
| 9             | 59,4     | 17,29               | 298,9441              |               |          |                     |                       |
| 10            | 43,3     | 1,19                | 1,4161                |               |          |                     |                       |
| Ср.знач       | 42,11    |                     |                       |               |          |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 7,54136               |               |          |                     |                       |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,179087              |               |          |                     |                       |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 49,28344              |               |          |                     |                       |

Таблица Г.2. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта по сортам при нагружении эластичными поверхностями при определении количества опытов

| $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|---------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------|----------|---------------------|-----------------------|
| “Атласный”    |          |                     |                       | “Барвинок”    |          |                     |                       |
| 1             | 74,9     | 35,72               | 1275,918              | 1             | 47,6     | 0,27                | 0,0729                |
| 2             | 65,1     | 25,92               | 671,8464              | 2             | 36,7     | -10,63              | 112,9969              |
| 3             | 86,7     | 47,52               | 2258,15               | 3             | 33,6     | -13,73              | 188,5129              |
| 4             | 73,2     | 34,02               | 1157,36               | 4             | 59,3     | 11,97               | 143,2809              |
| 5             | 79,7     | 40,52               | 1641,87               | 5             | 46,4     | -0,93               | 0,8649                |
| 6             | 75,2     | 36,02               | 1297,44               | 6             | 56,2     | 8,87                | 78,6769               |
| 7             | 74,1     | 34,92               | 1219,406              | 7             | 34,5     | -12,83              | 164,6089              |
| 8             | 48       | 8,82                | 77,7924               | 8             | 61,8     | 14,47               | 209,3809              |
| 9             | 65,2     | 26,02               | 677,0404              | 9             | 36,8     | -10,53              | 110,8809              |
| 10            | 58,8     | 19,62               | 384,9444              | 10            | 60,4     | 13,07               | 170,8249              |
| Ср.знач       | 70,09    |                     |                       | Ср.знач       | 47,33    |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 11,09299              | Дисперсия     |          | S                   | 11,45087              |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,158268              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,241937              |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 38,4908               | Кол-во изм.   |          | n                   | 89,94474              |
| “Кременец”    |          |                     |                       | “Лагидный”    |          |                     |                       |
| 1             | 79,1     | 25,51               | 650,7601              | 1             | 35,7     | 1,1                 | 1,21                  |
| 2             | 48,5     | -5,09               | 25,9081               | 2             | 38,1     | 3,5                 | 12,25                 |
| 3             | 70,4     | 16,81               | 282,5761              | 3             | 31,7     | -2,9                | 8,41                  |
| 4             | 43,9     | -9,69               | 93,8961               | 4             | 34,4     | -0,2                | 0,04                  |
| 5             | 36,7     | -16,89              | 285,2721              | 5             | 18,7     | -15,9               | 252,81                |
| 6             | 51,6     | -1,99               | 3,9601                | 6             | 43,4     | 8,8                 | 77,44                 |
| 7             | 39,1     | -14,49              | 209,9601              | 7             | 27,6     | -7                  | 49                    |
| 8             | 56,8     | 3,21                | 10,3041               | 8             | 36       | 1,4                 | 1,96                  |
| 9             | 50,2     | -3,39               | 11,4921               | 9             | 37,4     | 2,8                 | 7,84                  |
| 10            | 59,6     | 6,01                | 36,1201               | 10            | 43       | 8,4                 | 70,56                 |
| Ср.знач       | 53,59    |                     |                       | Ср.знач       | 34,6     |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 13,37597              | Дисперсия     |          | S                   | 7,314521              |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,249598              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,211402              |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 95,73156              | Кол-во изм.   |          | n                   | 68,67391              |

Продолжение табл. Г.2.

| $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|---------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------|----------|---------------------|-----------------------|
| “Серпневый”   |          |                     |                       | “Флора”       |          |                     |                       |
| 1             | 37,3     | -7,75               | 60,0625               | 1             | 44,9     | 7,27                | 52,8529               |
| 2             | 32,5     | -12,55              | 157,5025              | 2             | 37,7     | 0,07                | 0,0049                |
| 3             | 58,7     | 13,65               | 186,3225              | 3             | 41,1     | 3,47                | 12,0409               |
| 4             | 40,1     | -4,95               | 24,5025               | 4             | 27,5     | -10,13              | 102,6169              |
| 5             | 55,9     | 10,85               | 117,7225              | 5             | 28,1     | -9,53               | 90,8209               |
| 6             | 32,2     | -12,85              | 165,1225              | 6             | 38,1     | 0,47                | 0,2209                |
| 7             | 46,2     | 1,15                | 1,3225                | 7             | 34,8     | -2,83               | 8,0089                |
| 8             | 31,9     | -13,15              | 172,9225              | 8             | 24,3     | -13,33              | 177,6889              |
| 9             | 61,1     | 16,05               | 257,6025              | 9             | 55,7     | 18,07               | 326,5249              |
| 10            | 54,6     | 9,55                | 91,2025               | 10            | 44,1     | 6,47                | 41,8609               |
| Ср.знач       | 45,05    |                     |                       | Ср.знач       | 37,63    |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 11,7108               | Дисперсия     |          | S                   | 9,502286              |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,259951              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,252519              |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 103,8378              | Кол-во изм.   |          | n                   | 97,98507              |
| “V – 5F1”     |          |                     |                       |               |          |                     |                       |
| 1             | 62,9     | 13,12               | 172,1344              |               |          |                     |                       |
| 2             | 62,6     | 12,82               | 164,3524              |               |          |                     |                       |
| 3             | 31,1     | -18,68              | 348,9424              |               |          |                     |                       |
| 4             | 50,1     | 0,32                | 0,1024                |               |          |                     |                       |
| 5             | 61,6     | 11,82               | 139,7124              |               |          |                     |                       |
| 6             | 35,9     | -13,88              | 192,6544              |               |          |                     |                       |
| 7             | 47,4     | -2,38               | 5,6644                |               |          |                     |                       |
| 8             | 44,4     | -5,38               | 28,9444               |               |          |                     |                       |
| 9             | 45,2     | -4,58               | 20,9764               |               |          |                     |                       |
| 10            | 56,6     | 6,82                | 46,5124               |               |          |                     |                       |
| Ср.знач       | 49,78    |                     |                       |               |          |                     |                       |
| Дисперсия     |          | S                   | 11,15545              |               |          |                     |                       |
| Коэф.вариации |          | V                   | 0,224095              |               |          |                     |                       |
| Кол-во изм.   |          | n                   | 77,16783              |               |          |                     |                       |

Таблица Г.3. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров закрытого грунта по сортам при нагружении жесткими поверхностями при определении количества опытов

| $n_i$            | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|------------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------|----------|---------------------|-----------------------|
| “Красная стрела” |          |                     |                       | “Верлиока”    |          |                     |                       |
| 1                | 48,7     | 2,72                | 7,3984                | 1             | 59,2     | 4,97                | 24,7009               |
| 2                | 43,1     | -2,88               | 8,2944                | 2             | 51,4     | -2,83               | 8,0089                |
| 3                | 63,1     | 17,12               | 293,0944              | 3             | 35,5     | -18,73              | 350,8129              |
| 4                | 49,6     | 3,62                | 13,1044               | 4             | 58,8     | 4,57                | 20,8849               |
| 5                | 51,5     | 5,52                | 30,4704               | 5             | 64,5     | 10,27               | 105,4729              |
| 6                | 50,2     | 4,22                | 17,8084               | 6             | 60,5     | 6,27                | 39,3129               |
| 7                | 49,3     | 3,32                | 11,0224               | 7             | 50       | -4,23               | 17,8929               |
| 8                | 31,7     | -14,28              | 203,9184              | 8             | 45,6     | -8,63               | 74,4769               |
| 9                | 24,5     | -21,48              | 461,3904              | 9             | 65,5     | 11,27               | 127,0129              |
| 10               | 48,1     | 2,12                | 4,4944                | 10            | 51,3     | -2,93               | 8,5849                |
| Ср.знач          | 45,98    |                     |                       | Ср.знач       | 54,23    |                     |                       |
| Дисперсия        |          | S                   | 10,80636              | Дисперсия     |          | S                   | 9,292536              |
| Коэф.вариации    |          | V                   | 0,235023              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,171354              |
| Кол-во изм.      |          | n                   | 84,87753              | Кол-во изм.   |          | n                   | 45,1192               |

Таблица Г.4. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров закрытого грунта по сортам при нагружении эластичными поверхностями при определении количества опытов

| $n_i$            | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$         | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|------------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------|----------|---------------------|-----------------------|
| “Красная стрела” |          |                     |                       | “Верлиока”    |          |                     |                       |
| 1                | 66,2     | 5,64                | 31,8096               | 1             | 65,9     | -2,22               | 4,9284                |
| 2                | 58,4     | -2,16               | 4,6656                | 2             | 61,8     | -6,32               | 39,9424               |
| 3                | 50,4     | -10,16              | 103,2256              | 3             | 96,3     | 28,18               | 794,1124              |
| 4                | 68,5     | 7,94                | 63,0436               | 4             | 56,7     | -11,42              | 130,4164              |
| 5                | 67,2     | 6,64                | 44,0896               | 5             | 70,9     | 2,78                | 7,7284                |
| 6                | 69,3     | 8,74                | 76,3876               | 6             | 53,3     | -14,82              | 219,6324              |
| 7                | 56,4     | -4,16               | 17,3056               | 7             | 57,7     | -10,42              | 108,5764              |
| 8                | 71,1     | 10,54               | 111,0916              | 8             | 50,2     | -17,92              | 321,1264              |
| 9                | 37,3     | -23,26              | 541,0276              | 9             | 73,7     | 5,58                | 31,1364               |
| 10               | 60,8     | 0,24                | 0,0576                | 10            | 94,7     | 26,58               | 706,4964              |
| Ср.знач          | 60,56    |                     |                       | Ср.знач       | 68,12    |                     |                       |
| Дисперсия        |          | S                   | 10,5024               | Дисперсия     |          | S                   | 16,20732              |
| Коэф.вариации    |          | V                   | 0,173421              | Коэф.вариации |          | V                   | 0,237923              |
| Кол-во изм.      |          | n                   | 46,21444              | Кол-во изм.   |          | n                   | 86,98522              |

Таблица Д.1. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Атласный» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 80,2     | 24,782              | 614,1475              | 36    | 77,2     | 21,782              | 474,4555              |
| 2     | 62,6     | 7,182               | 51,58112              | 37    | 66,7     | 11,282              | 127,2835              |
| 3     | 23,1     | -32,318             | 1044,453              | 38    | 82,5     | 27,082              | 733,4347              |
| 4     | 47,7     | -7,718              | 59,56752              | 39    | 62,2     | 6,782               | 45,99552              |
| 5     | 61,6     | 6,182               | 38,21712              | 40    | 66,3     | 10,882              | 118,4179              |
| 6     | 70,6     | 15,182              | 230,4931              | 41    | 33,5     | -21,918             | 480,3987              |
| 7     | 68,2     | 12,782              | 163,3795              | 42    | 25,7     | -29,718             | 883,1595              |
| 8     | 58,8     | 3,382               | 11,43792              | 43    | 18,8     | -36,618             | 1340,878              |
| 9     | 50,1     | -5,318              | 28,28112              | 44    | 53,4     | -2,018              | 4,072324              |
| 10    | 51,5     | -3,918              | 15,35072              | 45    | 74,5     | 19,082              | 364,1227              |
| 11    | 67,9     | 12,482              | 155,8003              | 46    | 18,7     | -36,718             | 1348,212              |
| 12    | 58,4     | 2,982               | 8,892324              | 47    | 67,8     | 12,382              | 153,3139              |
| 13    | 31,1     | -24,318             | 591,3651              | 48    | 49,7     | -5,718              | 32,69552              |
| 14    | 50,7     | -4,718              | 22,25952              | 49    | 42,3     | -13,118             | 172,0819              |
| 15    | 77,1     | 21,682              | 470,1091              | 50    | 79,8     | 24,382              | 594,4819              |
| 16    | 61,9     | 6,482               | 42,01632              | 51    | 62,4     | 6,982               | 48,74832              |
| 17    | 68,4     | 12,982              | 168,5323              | 52    | 53,2     | -2,218              | 4,919524              |
| 18    | 60,2     | 4,782               | 22,86752              | 53    | 78,8     | 23,382              | 546,7179              |
| 19    | 47,2     | -8,218              | 67,53552              | 54    | 39,8     | -15,618             | 243,9219              |
| 20    | 51,2     | -4,218              | 17,79152              | 55    | 36,2     | -19,218             | 369,3315              |
| 21    | 53,1     | -2,318              | 5,373124              | 56    | 85,9     | 30,482              | 929,1523              |
| 22    | 61,4     | 5,982               | 35,78432              | 57    | 14,8     | -40,618             | 1649,822              |
| 23    | 27,4     | -28,018             | 785,0083              | 58    | 71,6     | 16,182              | 261,8571              |
| 24    | 51,8     | -3,618              | 13,08992              | 59    | 38,1     | -17,318             | 299,9131              |
| 25    | 35,6     | -19,818             | 392,7531              | 60    | 28,3     | -27,118             | 735,3859              |
| 26    | 40,5     | -14,918             | 222,5467              | 61    | 69,6     | 14,182              | 201,1291              |
| 27    | 58,2     | 2,782               | 7,739524              | 62    | 28,6     | -26,818             | 719,2051              |
| 28    | 75,6     | 20,182              | 407,3131              | 63    | 76,9     | 21,482              | 461,4763              |
| 29    | 63,4     | 7,982               | 63,71232              | 64    | 78,2     | 22,782              | 519,0195              |
| 30    | 61       | 5,582               | 31,15872              | 65    | 61       | 5,582               | 31,15872              |
| 31    | 40       | -15,418             | 237,7147              | 66    | 68,2     | 12,782              | 163,3795              |
| 32    | 72,2     | 16,782              | 281,6355              | 67    | 16,4     | -39,018             | 1522,404              |
| 33    | 45,2     | -10,218             | 104,4075              | 68    | 82,5     | 27,082              | 733,4347              |
| 34    | 73,6     | 18,182              | 330,5851              | 69    | 68       | 12,582              | 158,3067              |

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$              | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|--------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 35    | 57,9     | 2,482               | 6,160324              | 70                 | 66,2     | 10,782              | 116,2515              |
| 71    | 85       | 29,582              | 875,0947              | 86                 | 45,1     | -10,318             | 106,4611              |
| 72    | 81,1     | 25,682              | 659,5651              | 87                 | 51,4     | -4,018              | 16,14432              |
| 73    | 68,8     | 13,382              | 179,0779              | 88                 | 53,2     | -2,218              | 4,919524              |
| 74    | 70,4     | 14,982              | 224,4603              | 89                 | 44,3     | -11,118             | 123,6099              |
| 75    | 43,4     | -12,018             | 144,4323              | 90                 | 63,3     | 7,882               | 62,12592              |
| 76    | 54,4     | -1,018              | 1,036324              | 91                 | 34,6     | -20,818             | 433,3891              |
| 77    | 60,1     | 4,682               | 21,92112              | 92                 | 49       | -6,418              | 41,19072              |
| 78    | 55,8     | 0,382               | 0,145924              | 93                 | 45,6     | -9,818              | 96,39312              |
| 79    | 55,4     | -0,018              | 0,000324              | 94                 | 64,4     | 8,982               | 80,67632              |
| 80    | 62,5     | 7,082               | 50,15472              | 95                 | 59,9     | 4,482               | 20,08832              |
| 81    | 23,6     | -31,818             | 1012,385              | 96                 | 46,7     | -8,718              | 76,00352              |
| 82    | 52,7     | -2,718              | 7,387524              | 97                 | 55,3     | -0,118              | 0,013924              |
| 83    | 22,2     | -33,218             | 1103,436              | 98                 | 56,5     | 1,082               | 1,170724              |
| 84    | 61,6     | 6,182               | 38,21712              | 99                 | 43,2     | -12,218             | 149,2795              |
| 85    | 63,8     | 8,382               | 70,25792              | 100                | 59,3     | 3,882               | 15,06992              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$           | 5541,8   |                     | 28951,71              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия          |          |                     | 292,44                |
|       |          |                     |                       | Сред.квдр-ое откл. |          |                     | 17,1                  |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации   |          |                     | 0,308                 |

Среднее значение разрушающей нагрузки вычисляем по формуле:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \text{ (в Н)},$$

где:  $P_i$  — значение  $i$ -го измерения (в Н);  $n$  — число измерений.

Выборочная дисперсия:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1} .$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}} .$$

Коэффициент вариации

$$V = \frac{S}{\bar{P}} .$$



Таблица Д.2. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров закрытого грунта сорта «Барвинок» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 38,3     | -0,373              | 0,139129              | 36    | 28,1     | -10,573             | 111,7883              |
| 2     | 22,2     | -16,473             | 271,3597              | 37    | 33,7     | -4,973              | 24,73073              |
| 3     | 23,6     | -15,073             | 227,1953              | 38    | 25,6     | -13,073             | 170,9033              |
| 4     | 41,6     | 2,927               | 8,567329              | 39    | 46       | 7,327               | 53,68493              |
| 5     | 31,6     | -7,073              | 50,02733              | 40'   | 46,5     | 7,827               | 61,26193              |
| 6     | 50       | 11,327              | 128,3009              | 41    | 41       | 2,327               | 5,414929              |
| 7     | 34,1     | -4,573              | 20,91233              | 42    | 42       | 3,327               | 11,06893              |
| 8     | 47,6     | 8,927               | 79,69133              | 43    | 33,4     | -5,273              | 27,80453              |
| 9     | 37,4     | -1,273              | 1,620529              | 44    | 42,6     | 3,927               | 15,42133              |
| 10    | 55,4     | 16,727              | 279,7925              | 45    | 42,9     | 4,227               | 17,86753              |
| 11    | 40,6     | 1,927               | 3,713329              | 46    | 30,5     | -8,173              | 66,79793              |
| 12    | 36,7     | -1,973              | 3,892729              | 47    | 38,5     | -0,173              | 0,029929              |
| 13    | 40,5     | 1,827               | 3,337929              | 48    | 37,4     | -1,273              | 1,620529              |
| 14    | 48,7     | 10,027              | 100,5407              | 49    | 26       | -12,673             | 160,6049              |
| 15    | 25,9     | -12,773             | 163,1495              | 50    | 41,1     | 2,427               | 5,890329              |
| 16    | 36,1     | -2,573              | 6,620329              | 51    | 32,4     | -6,273              | 39,35053              |
| 17    | 31,9     | -6,773              | 45,87353              | 52    | 37       | -1,673              | 2,798929              |
| 18    | 46,4     | 7,727               | 59,70653              | 53    | 42,9     | 4,227               | 17,86753              |
| 19    | 20,9     | -17,773             | 315,8795              | 54    | 45       | 6,327               | 40,03093              |
| 20    | 32       | -6,673              | 44,52893              | 55    | 37,7     | -0,973              | 0,946729              |
| 21    | 38,2     | -0,473              | 0,223729              | 56    | 47,9     | 9,227               | 85,13753              |
| 22    | 51,7,    | .13,027             | 169,7027              | 57    | 44,4     | 5,727               | 32,79853              |
| 23    | 32,5..   | -6,1,73             | 38,10593              | 58    | 39,1     | 0,427               | 0,182329              |
| 24    | 35,2     | -3,473              | 12,06173              | 59    | 52,5     | 13,827              | 191,1859              |
| 25    | 25,6     | -13,073             | 170,9033              | 60    | 41,7     | 3,027               | 9,162729              |
| 26    | 39,6     | 0,927               | 0,859329              | 61    | 39,4     | 0,727               | 0,528529              |
| 27    | 35,4     | -3,273              | 10,71253              | 62    | 42,2     | 3,527               | 12,43973              |
| 28    | 39,5     | 0,827               | 0,683929              | 63    | 55,5     | 16,827              | 283,1479              |
| 29    | 45,1     | 6,427               | 41,30633              | 64    | 48,8     | 10,127              | 102,5561              |
| 30    | 34,9     | -3,773              | 14,23553              | 65    | 34,1     | -4,573              | 20,91233              |
| 31    | 26,3     | -12,373             | 153,0911              | 66    | 46,5     | 7,827               | 61,26193              |
| 32    | 31,7     | -6,973              | 48,62273              | 67    | 45,7     | 7,027               | 49,37873              |
| 33    | 31,8     | -6,873              | 47,23813              | 68    | 26,8     | -11,873             | 140,9681              |
| 34    | 26,3     | -12,373             | 153,0911              | 69    | 27       | -11,673             | 136,2589              |
| 35    | 28,4     | -10,273             | 105,5345              | 70    | 33,8     | -4,873              | 23,74613              |

Продолжение табл. Д.2.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 40,7     | 2,027               | 4,108729              | 86                   | 33       | -5,673              | 32,18293              |
| 72    | 40,1     | 1,427               | 2,036329              | 87                   | 34,4     | -4,273              | 18,25853              |
| 73    | 56,5     | 17,827              | 317,8019              | 88                   | 43,2     | 4,527               | 20,49373              |
| 74    | 51,6     | 12,927              | 167,1073              | 89                   | 61       | 22,327              | 498,4949              |
| 75    | 46,2     | 7,527               | 56,65573              | 90                   | 38,9     | 0,227               | 0,051529              |
| 76    | 35       | -3,673              | 13,49093              | 91                   | 44,5     | 5,827               | 33,95393              |
| 77    | 49,8     | 11,127              | 123,8101              | 92                   | 28,5     | -10,173             | 103,4899              |
| 78    | 37       | -1,673              | 2,798929              | 93                   | 36,7     | -1,973              | 3,892729              |
| 79    | 43,1     | 4,427               | 19,59833              | 94                   | 42,1     | 3,427               | 11,74433              |
| 80    | 42,3     | 3,627               | 13,15513              | 95                   | 34,3     | -4,373              | 19,12313              |
| 81    | 34,3     | -4,373              | 19,12313              | 96                   | 35,6     | -3,073              | 9,443329              |
| 82    | 49,3     | 10,627              | 112,9331              | 97                   | 32       | -6,673              | 44,52893              |
| 83    | 34,9     | -3,773              | 14,23553              | 98                   | 33,3     | -5,373              | 28,86913              |
| 84    | 56,5     | 17,827              | 317,8019              | 99                   | 45,8     | 7,127               | 50,79413              |
| 85    | 30,7     | -7,973              | 63,56873              | 100                  | 36,6     | -2,073              | 4,297329              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 3867,3   |                     | 6894,617              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 69,6426               |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 8,345214              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,215789              |

Таблица Д.3. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Кременец» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 60,1     | 5,222               | 27,26928              | 36    | 56,2     | 1,322               | 1,747684              |
| 2     | 58,3     | 3,422               | 11,71008              | 37    | 53,9     | -0,978              | 0,956484              |
| 3     | 62,9     | 8,022               | 64,35248              | 38    | 36,9     | -17,978             | 323,2085              |
| 4     | 44,1     | -10,778             | 116,1653              | 39    | 64,1     | 9,222               | 85,04528              |
| 5     | 55,4     | 0,522               | 0,272484              | 40    | 64       | 9,122               | 83,21088              |
| 6     | 65,3     | 10,422              | 108,6181              | 41    | 62,7     | 7,822               | 61,18368              |
| 7     | 55,2     | 0,322               | 0,103684              | 42    | 45,8     | -9,078              | 82,41008              |
| 8     | 51,9     | -2,978              | 8,868484              | 43    | 50,1     | -4,778              | 22,82928              |
| 9     | 54,6     | -0,278              | 0,077284              | 44    | 61       | 6,122               | 37,47888              |
| 10    | 53,6     | -1,278              | 1,633284              | 45    | 63,1     | 8,222               | 67,60128              |
| 11    | 50,4     | -4,478              | 20,05248              | 46    | 41,5     | -13,378             | 178,9709              |
| 12    | 59,1     | 4,222               | 17,82528              | 47    | 57,2     | 2,322               | 5,391684              |
| 13    | 72,8     | 17,922              | 321,1981              | 48    | 62,9     | 8,022               | 64,35248              |
| 14    | 58,8     | 3,922               | 15,38208              | 49    | 28,7     | -26,178             | 685,2877              |
| 15    | 55,6     | 0,722               | 0,521284              | 50    | 47,7     | -7,178              | 51,52368              |
| 16    | 65       | 10,122              | 102,4549              | 51    | 60,1     | 5,222               | 27,26928              |
| 17    | 56,6     | 1,722               | 2,965284              | 52    | 49,1     | -5,778              | 33,38528              |
| 18    | 63,5     | 8,622               | 74,33888              | 53    | 47,4     | -7,478              | 55,92048              |
| 19    | 54,1     | -0,778              | 0,605284              | 54    | 52,5     | -2,378              | 5,654884              |
| 20    | 64,6     | 9,722               | 94,51728              | 55    | 54       | -0,878              | 0,770884              |
| 21    | 58,6     | 3,722               | 13,85328              | 56    | 49,1     | -5,778              | 33,38528              |
| 22    | 59,4     | 4,522               | 20,44848              | 57    | 28,4     | -26,478             | 701,0845              |
| 23    | 50,1     | -4,778              | 22,82928              | 58    | 49       | -5,878              | 34,55088              |
| 24    | 56,9     | 2,022               | 4,088484              | 59    | 58,5     | 3,622               | 13,11888              |
| 25    | 58,7     | 3,822               | 14,60768              | 60    | 51,7     | -3,178              | 10,09968              |
| 26    | 52,5     | -2,378              | 5,654884              | 61    | 60,9     | 6,022               | 36,26448              |
| 27    | 67,3     | 12,422              | 154,3061              | 62    | 69,4     | 14,522              | 210,8885              |
| 28    | 50,3     | -4,578              | 20,95808              | 63    | 76,8     | 21,922              | 480,5741              |
| 29    | 68,1     | 13,222              | 174,8213              | 64    | 37,8     | -17,078             | 291,6581              |
| 30    | 37,4     | -17,478             | 305,4805              | 65    | 50,4     | -4,478              | 20,05248              |
| 31    | 45       | -9,878              | 97,57488              | 66    | 37,8     | -17,078             | 291,6581              |
| 32    | 56,4     | 1,522               | 2,316484              | 67    | 45,7     | -9,178              | 84,23568              |
| 33    | 46,5     | -8,378              | 70,19088              | 68    | 47,6     | -7,278              | 52,96928              |
| 34    | 40,1     | -14,778             | 218,3893              | 69    | 47,1     | -7,778              | 60,49728              |
| 35    | 59       | 4,122               | 16,99088              | 70    | 59       | 4,122               | 16,99088              |

Продолжение табл. Д.3.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 68,6     | 13,722              | 188,2933              | 86                   | 57,3     | 2,422               | 5,866084              |
| 72    | 48,4     | -6,478              | 41,96448              | 87                   | 61       | 6,122               | 37,47888              |
| 73    | 61,3     | 6,422               | 41,24208              | 88                   | 50,2     | -4,678              | 21,88368              |
| 74    | 64,4     | 9,522               | 90,66848              | 89                   | 66,8     | 11,922              | 142,1341              |
| 75    | 46,5     | -8,378              | 70,19088              | 90                   | 54,5     | -0,378              | 0,142884              |
| 76    | 46,8     | -8,078              | 65,25408              | 91                   | 69       | 14,122              | 199,4309              |
| 77    | 48,1     | -6,778              | 45,94128              | 92                   | 61,7     | 6,822               | 46,53968              |
| 78    | 63,2     | 8,322               | 69,25568              | 93                   | 72       | 17,122              | 293,1629              |
| 79    | 55,6     | 0,722               | 0,521284              | 94                   | 38,6     | -16,278             | 264,9733              |
| 80    | 47,3     | -7,578              | 57,42608              | 95                   | 65,9     | 11,022              | 121,4845              |
| 81    | 53,7     | -1,178              | 1,387684              | 96                   | 55,2     | 0,322               | 0,103684              |
| 82    | 67,2     | 12,322              | 151,8317              | 97                   | 44,9     | -9,978              | 99,56048              |
| 83    | 48,1     | -6,778              | 45,94128              | 98                   | 48,9     | -5,978              | 35,73648              |
| 84    | 55,6     | 0,722               | 0,521284              | 99                   | 64,7     | 9,822               | 96,47168              |
| 85    | 52       | -2,878              | 8,282884              | 100                  | 54       | -0,878              | 0,770884              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 5487,8   |                     | 8588,132              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 86,7488               |
|       |          |                     |                       | Сред. Квадр-ое откл. |          |                     | 9,313904              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,16972               |

Таблица Д.4. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Лагидный» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 31,3     | 0,315               | 0,099225              | 36    | 40       | 9,015               | 81,27023              |
| 2     | 38,5     | 7,515               | 56,47523              | 37    | 24,9     | -6,085              | 37,02723              |
| 3     | 21,2     | -9,785              | 95,74622              | 38    | 47,5     | 16,515              | 272,7452              |
| 4     | 31,4     | 0,415               | 0,172225              | 39    | 23,8     | -7,185              | 51,62422              |
| 5     | 51,5     | 20,515              | 420,8652              | 40    | 16,2     | -14,785             | 218,5962              |
| 6     | 26,8     | -4,185              | 17,51423              | 41    | 29,1     | -1,885              | 3,553225              |
| 7     | 25,4     | -5,585              | 31,19223              | 42    | 27       | -3,985              | 15,88023              |
| 8     | 26,5     | -4,485              | 20,11523              | 43    | 31,1     | 0,115               | 0,013225              |
| 9     | 38,4     | 7,415               | 54,98223              | 44    | 24,6     | -6,385              | 40,76822              |
| 10    | 25,4     | -5,585              | 31,19223              | 45    | 35,6     | 4,615               | 21,29823              |
| 11    | 39,9     | 8,915               | 79,47723              | 46    | 30,9     | -0,085              | 0,007225              |
| 12    | 48,4     | 17,415              | 303,2822              | 47    | 27,4     | -3,585              | 12,85223              |
| 13    | 26,3     | -4,685              | 21,94923              | 48    | 36,8     | 5,815               | 33,81423              |
| 14    | 33,2     | 2,215               | 4,906225              | 49    | 40,8     | 9,815               | 96,33423              |
| 15    | 23,6     | -7,385              | 54,53822              | 50    | 27,3     | -3,685              | 13,57923              |
| 16    | 40,5     | 9,515               | 90,53523              | 51    | 31,7     | 0,715               | 0,511225              |
| 17    | 33,2     | 2,215               | 4,906225              | 52    | 32,3     | 1,315               | 1,729225              |
| 18    | 50       | 19,015              | 361,5702              | 53    | 39,9     | 8,915               | 79,47723              |
| 19    | 31,3     | 0,315               | 0,099225              | 54    | 28,2     | -2,785              | 7,756225              |
| 20    | 18,9     | -12,085             | 146,0472              | 55    | 27       | -3,985              | 15,88023              |
| 21    | 11,9     | -19,085             | 364,2372              | 56    | 26,3     | -4,685              | 21,94923              |
| 22    | 38,1     | 7,115               | 50,62323              | 57    | 20,8     | -10,185             | 103,7342              |
| 23    | 37,9     | 6,915               | 47,81723              | 58    | 18,6     | -12,385             | 153,3882              |
| 24    | 26       | -4,985              | 24,85023              | 59    | 33       | 2,015               | 4,060225              |
| 25    | 42,3     | 11,315              | 128,0292              | 60    | 20       | -10,985             | 120,6702              |
| 26    | 29,9     | -1,085              | 1,177225              | 61    | 16,8     | -14,185             | 201,2142              |
| 27    | 18,9     | -12,085             | 146,0472              | 62    | 15       | -15,985             | 255,5202              |
| 28    | 22,6     | -8,385              | 70,30822              | 63    | 21,4     | -9,585              | 91,87222              |
| 29    | 51,3     | 20,315              | 412,6992              | 64    | 25,1     | -5,885              | 34,63322              |
| 30    | 31,9     | 0,915               | 0,837225              | 65    | 38       | 7,015               | 49,21023              |
| 31    | 19,4     | -11,585             | 134,2122              | 66    | 22       | -8,985              | 80,73022              |
| 32    | 38,6     | 7,615               | 57,98823              | 67    | 48,4     | 17,415              | 303,2822              |
| 33    | 20,8     | -10,185             | 103,7342              | 68    | 38       | 7,015               | 49,21023              |
| 34    | 41,9     | 10,915              | 119,1372              | 69    | 37,7     | 6,715               | 45,09123              |
| 35    | 32,3     | 1,315               | 1,729225              | 70    | 48,2     | 17,215              | 296,3562              |

Продолжение табл. Д.4.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 24,4     | -6,585              | 43,36223              | 86                   | 36       | 5,015               | 25,15023              |
| 72    | 37,2     | 6,215               | 38,62623              | 87                   | 36,8     | 5,815               | 33,81423              |
| 73    | 39,9     | 8,915               | 79,47723              | 88                   | 18,5     | -12,485             | 155,8752              |
| 74    | 33,8     | 2,815               | 7,924225              | 89                   | 28,6     | -2,385              | 5,688225              |
| 75    | 24       | -6,985              | 48,79022              | 90                   | 41       | 10,015              | 100,3002              |
| 76    | 46,6     | 15,615              | 243,8282              | 91                   | 38,4     | 7,415               | 54,98223              |
| 77    | 31,4     | 0,415               | 0,172225              | 92                   | 11,8     | -19,185             | 368,0642              |
| 78    | 19,6     | -11,385             | 129,6182              | 93                   | 27,2     | -3,785              | 14,32623              |
| 79    | 25,5     | -5,485              | 30,08523              | 94                   | 33,4     | 2,415               | 5,832225              |
| 80    | 28,9     | -2,085              | 4,347225              | 95                   | 47,1     | 16,115              | 259,6932              |
| 81    | 32,5     | 1,515               | 2,295225              | 96                   | 22,6     | -8,385              | 70,30822              |
| 82    | 40,4     | 9,415               | 88,64223              | 97                   | 32,7     | 1,715               | 2,941225              |
| 83    | 22,8     | -8,185              | 66,99422              | 98                   | 35,1     | 4,115               | 16,93323              |
| 84    | 24,6     | -6,385              | 40,76822              | 99                   | 31,2     | 0,215               | 0,046225              |
| 85    | 15,3     | -15,685             | 246,0192              | 100                  | 34,3     | 3,315               | 10,98923              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 3098,5   |                     | 8470,628              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 85,56189              |
|       |          |                     |                       | Сред. Квадр-ое откл. |          |                     | 9,249967              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,29853               |

Таблица Д.5. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «V-5 F1» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 30       | -8,8578             | 78,46062              | 36    | 15,7     | -23,157             | 536,2837              |
| 2     | 44,9     | 6,0422              | 36,50818              | 37    | 59       | 20,1422             | 405,7082              |
| 3     | 41,4     | 2,5422              | 6,462781              | 38    | 40,5     | 1,6422              | 2,696821              |
| 4     | 43,8     | 4,9422              | 24,42534              | 39    | 36,7     | -2,1578             | 4,656101              |
| 5     | 37,1     | -1,7578             | 3,089861              | 40    | 30,1     | -8,7578             | 76,69906              |
| 6     | 39,5     | 0,6422              | 0,412421              | 41    | 46,7     | 7,8422              | 61,5001               |
| 7     | 37,8     | -1,0578             | 1,118941              | 42    | 48,3     | 9,4422              | 89,15514              |
| 8     | 43,9     | 5,0422              | 25,42378              | 43    | 54,3     | 15,4422             | 238,4615              |
| 9     | 59,4     | 20,5422             | 421,982               | 44    | 43,5     | 4,6422              | 21,55002              |
| 10    | 43,3     | 4,4422              | 19,73314              | 45    | 29       | -9,8578             | 97,17622              |
| 11    | 31,7     | -7,1578             | 51,2341               | 46    | 43,8     | 4,9422              | 24,42534              |
| 12    | 25,9     | -12,957             | 167,9046              | 47    | 8,13     | -30,727             | 944,1977              |
| 13    | 37,4     | -1,4578             | 2,125181              | 48    | 40,3     | 1,4422              | 2,079941              |
| 14    | 49,1     | 10,2422             | 104,9027              | 49    | 49,6     | 10,7422             | 115,3949              |
| 15    | 54,7     | 15,8422             | 250,9753              | 50    | 31,9     | -6,9578             | 48,41098              |
| 16    | 15,9     | -22,957             | 527,0606              | 51    | 14,8     | -24,057             | 578,7777              |
| 17    | 52,3     | 13,4422             | 180,6927              | 52    | 49,6     | 10,7422             | 115,3949              |
| 18    | 48,6     | 9,7422              | 94,91046              | 53    | 44,4     | 5,5422              | 30,71598              |
| 19    | 16,7     | -22,157             | 490,9681              | 54    | 29       | -9,8578             | 97,17622              |
| 20    | 49,6     | 10,7422             | 115,3949              | 55    | 45,5     | 6,6422              | 44,11882              |
| 21    | 36,2     | -2,6578             | 7,063901              | 56    | 58,8     | 19,9422             | 397,6913              |
| 22    | 35,3     | -3,5578             | 12,65794              | 57    | 40,4     | 1,5422              | 2,378381              |
| 23    | 49,6     | 10,7422             | 115,3949              | 58    | 50       | 11,1422             | 124,1486              |
| 24    | 60,4     | 21,5422             | 464,0664              | 59    | 53,8     | 14,9422             | 223,2693              |
| 25    | 31,2     | -7,6578             | 58,6419               | 60    | 39,5     | 0,6422              | 0,412421              |
| 26    | 57,5     | 18,6422             | 347,5316              | 61    | 44,6     | 5,7422              | 32,97286              |
| 27    | 41,3     | 2,4422              | 5,964341              | 62    | 36,8     | -2,0578             | 4,234541              |
| 28    | 35,9     | -2,9578             | 8,748581              | 63    | 26,1     | -12,757             | 162,7615              |
| 29    | 36,7     | -2,1578             | 4,656101              | 64    | 60,2     | 21,3422             | 455,4895              |
| 30    | 46,6     | 7,7422              | 59,94166              | 65    | 37,4     | -1,4578             | 2,125181              |
| 31    | 61,7     | 22,8422             | 521,7661              | 66    | 43,5     | 4,6422              | 21,55002              |
| 32    | 34,1     | -4,7578             | 22,63666              | 67    | 31,9     | -6,9578             | 48,41098              |
| 33    | 38,3     | -0,5578             | 0,311141              | 68    | 50,9     | 12,0422             | 145,0146              |
| 34    | 43,4     | 4,5422              | 20,63158              | 69    | 45,8     | 6,9422              | 48,19414              |
| 35    | 26,5     | -12,357             | 152,7152              | 70    | 9,2      | -29,657             | 879,5851              |

Продолжение табл.Б.5.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 42,1     | 3,2422              | 10,51186              | 86                   | 28,95    | -9,9078             | 98,1645               |
| 72    | 32,2     | -6,6578             | 44,3263               | 87                   | 56,4     | 17,5422             | 307,7288              |
| 73    | 28,8     | -10,057             | 101,1593              | 88                   | 40,4     | 1,5422              | 2,378381              |
| 74    | 40,4     | 1,5422              | 2,378381              | 89                   | 50,2     | 11,3422             | 128,6455              |
| 75    | 26,8     | -12,057             | 145,3905              | 90                   | 41       | 2,1422              | 4,589021              |
| 76    | 24,1     | -14,757             | 217,7927              | 91                   | 59,6     | 20,7422             | 430,2389              |
| 77    | 26,2     | -12,657             | 160,2199              | 92                   | 37,6     | -1,2578             | 1,582061              |
| 78    | 24,2     | -14,657             | 214,8511              | 93                   | 45,4     | 6,5422              | 42,80038              |
| 79    | 21,9     | -16,957             | 287,567               | 94                   | 39,8     | 0,9422              | 0,887741              |
| 80    | 44,1     | 5,2422              | 27,48066              | 95                   | 22,9     | -15,957             | 254,6514              |
| 81    | 36,7     | -2,1578             | 4,656101              | 96                   | 40,5     | 1,6422              | 2,696821              |
| 82    | 31,5     | -7,3578             | 54,13722              | 97                   | 42,6     | 3,7422              | 14,00406              |
| 83    | 30,2     | -8,6578             | 74,9575               | 98                   | 44,5     | 5,6422              | 31,83442              |
| 84    | 40,9     | 2,0422              | 4,170581              | 99                   | 11,5     | -27,357             | 748,4492              |
| 85    | 25       | -13,857             | 192,0386              | 100                  | 21,9     | -16,957             | 287,567               |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 3885,7   |                     | 14387,19              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 145,3251              |
|       |          |                     |                       | Сред. Квадр-ое откл. |          |                     | 12,05509              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,310236              |



Таблица Д.6. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Серпневгй» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 44,7     | 11,206              | 125,5744              | 36    | 40,7     | 7,206               | 51,92644              |
| 2     | 17,8     | -15,694             | 246,3016              | 37    | 34,2     | 0,706               | 0,498436              |
| 3     | 15,7     | -17,794             | 316,6264              | 38    | 28,7     | -4,794              | 22,98244              |
| 4     | 43,3     | 9,806               | 96,15764              | 39    | 28       | -5,494              | 30,18404              |
| 5     | 30,1     | -3,394              | 11,51924              | 40    | 35,3     | 1,806               | 3,261636              |
| 6     | 23,8     | -9,694              | 93,97364              | 41    | 42,2     | 8,706               | 75,79444              |
| 7     | 44,9     | 11,406              | 130,0968              | 42    | 26,5     | -6,994              | 48,91604              |
| 8     | 30,2     | -3,294              | 10,85044              | 43    | 27,6     | -5,894              | 34,73924              |
| 9     | 19,3     | -14,194             | 201,4696              | 44    | 32,8     | -0,694              | 0,481636              |
| 10    | 33,1     | -0,394              | 0,155236              | 45    | 29,6     | -3,894              | 15,16324              |
| 11    | 26,8     | -6,694              | 44,80964              | 46    | 18,1     | -15,394             | 236,9752              |
| 12    | 21,6     | -11,894             | 141,4672              | 47    | 20,5     | -12,994             | 168,844               |
| 13    | 42,5     | 9,006               | 81,10804              | 48    | 35,9     | 2,406               | 5,788836              |
| 14    | 40,5     | 7,006               | 49,08404              | 49    | 28,1     | -5,394              | 29,09524              |
| 15    | 13,9     | -19,594             | 383,9248              | 50    | 31,2     | -2,294              | 5,262436              |
| 16    | 26,4     | -7,094              | 50,32484              | 51    | 29,3     | -4,194              | 17,58964              |
| 17    | 45,8     | 12,306              | 151,4376              | 52    | 31,3     | -2,194              | 4,813636              |
| 18    | 27,7     | -5,794              | 33,57044              | 53    | 33,1     | -0,394              | 0,155236              |
| 19    | 37,3     | 3,806               | 14,48564              | 54    | 53,6     | 20,106              | 404,2512              |
| 20    | 24,2     | -9,294              | 86,37844              | 55    | 19,6     | -13,894             | 193,0432              |
| 21    | 27,6     | -5,894              | 34,73924              | 56    | 53,3     | 19,806              | 392,2776              |
| 22    | 30,2     | -3,294              | 10,85044              | 57    | 32,8     | -0,694              | 0,481636              |
| 23    | 27,2     | -6,294              | 39,61444              | 58    | 29,7     | -3,794              | 14,39444              |
| 24    | 31,1     | -2,394              | 5,731236              | 59    | 33       | -0,494              | 0,244036              |
| 25    | 22,5     | -10,994             | 120,868               | 60    | 21,5     | -11,994             | 143,856               |
| 26    | 22,4     | -11,094             | 123,0768              | 61    | 34,4     | 0,906               | 0,820836              |
| 27    | 18,4     | -15,094             | 227,8288              | 62    | 42,5     | 9,006               | 81,10804              |
| 28    | 41,4     | 7,906               | 62,50484              | 63    | 35,5     | 2,006               | 4,024036              |
| 29    | 31,8     | -1,694              | 2,869636              | 64    | 20,9     | -12,594             | 158,6088              |
| 30    | 24,8     | -8,694              | 75,58564              | 65    | 38,8     | 5,306               | 28,15364              |
| 31    | 32,6     | -0,894              | 0,799236              | 66    | 28,9     | -4,594              | 21,10484              |
| 32    | 17,4     | -16,094             | 259,0168              | 67    | 38,9     | 5,406               | 29,22484              |
| 33    | 32,7     | -0,794              | 0,630436              | 68    | 46,7     | 13,206              | 174,3984              |
| 34    | 46,1     | 12,606              | 158,9112              | 69    | 42,2     | 8,706               | 75,79444              |
| 35    | 26,3     | -7,194              | 51,75364              | 70    | 18,2     | -15,294             | 233,9064              |

Продолжение табл. Д.6.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 52,2     | 18,706              | 349,9144              | 86                   | 45,3     | 11,806              | 139,3816              |
| 72    | 50,8     | 17,306              | 299,4976              | 87                   | 29,8     | -3,694              | 13,64564              |
| 73    | 34,7     | 1,206               | 1,454436              | 88                   | 48,9     | 15,406              | 237,3448              |
| 74    | 62       | 28,506              | 812,592               | 89                   | 26,2     | -7,294              | 53,20244              |
| 75    | 36,9     | 3,406               | 11,60084              | 90                   | 55,3     | 21,806              | 475,5016              |
| 76    | 33,6     | 0,106               | 0,011236              | 91                   | 24,4     | -9,094              | 82,70084              |
| 77    | 36,6     | 3,106               | 9,647236              | 92                   | 27,5     | -5,994              | 35,92804              |
| 78    | 61,1     | 27,606              | 762,0912              | 93                   | 34,3     | 0,806               | 0,649636              |
| 79    | 18,5     | -14,994             | 224,82                | 94                   | 40,1     | 6,606               | 43,63924              |
| 80    | 41,2     | 7,706               | 59,38244              | 95                   | 34,6     | 1,106               | 1,223236              |
| 81    | 28,6     | -4,894              | 23,95124              | 96                   | 51,7     | 18,206              | 331,4584              |
| 82    | 25,3     | -8,194              | 67,14164              | 97                   | 28,8     | -4,694              | 22,03364              |
| 83    | 29,8     | -3,694              | 13,64564              | 98                   | 37,5     | 4,006               | 16,04804              |
| 84    | 39,9     | 6,406               | 41,03684              | 99                   | 41,2     | 7,706               | 59,38244              |
| 85    | 58,6     | 25,106              | 630,3112              | 100                  | 28,3     | -5,194              | 26,97764              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 3349,4   |                     | 10998,48              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 111,0957              |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 10,5402               |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,314689              |

Таблица Д.7. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Флора» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 28,8     | -3,692              | 13,63086              | 36    | 17,7     | -14,792             | 218,8033              |
| 2     | 40,9     | 8,408               | 70,69446              | 37    | 23,2     | -9,292              | 86,34126              |
| 3     | 26,4     | -6,092              | 37,11246              | 38    | 19,1     | -13,392             | 179,3457              |
| 4     | 21,5     | -10,992             | 120,8241              | 39    | 25,4     | -7,092              | 50,29646              |
| 5     | 34,8     | 2,308               | 5,326864              | 40    | 27,7     | -4,792              | 22,96326              |
| 6     | 38,8     | 6,308               | 39,79086              | 41    | 33,3     | 0,808               | 0,652864              |
| 7     | 22,7     | -9,792              | 95,88326              | 42    | 21,5     | -10,992             | 120,8241              |
| 8     | 31,6     | -0,892              | 0,795664              | 43    | 41,1     | 8,608               | 74,09766              |
| 9     | 22,6     | -9,892              | 97,85166              | 44    | 15,6     | -16,892             | 285,3397              |
| 10    | 39,3     | 6,808               | 46,34886              | 45    | 23,1     | -9,392              | 88,20966              |
| 11    | 22,2     | -10,292             | 105,9253              | 46    | 16,1     | -16,392             | 268,6977              |
| 12    | 36,8     | 4,308               | 18,55886              | 47    | 23,7     | -8,792              | 77,29926              |
| 13    | 34,4     | 1,908               | 3,640464              | 48    | 50,2     | 17,708              | 313,5733              |
| 14    | 17,8     | -21,41              | 458,3881              | 49    | 38,9     | 6,408               | 41,06246              |
| 15    | 28,8     | -3,692              | 13,63086              | 50    | 26,3     | -6,192              | 38,34086              |
| 16    | 23,3     | -9,192              | 84,49286              | 51    | 30,7     | -1,792              | 3,211264              |
| 17    | 38       | 5,508               | 30,33806              | 52    | 31,4     | -1,092              | 1,192464              |
| 18    | 27,7     | -4,792              | 22,96326              | 53    | 24,8     | -7,692              | 59,16686              |
| 19    | 32,9     | 0,408               | 0,166464              | 54    | 29,5     | -2,992              | 8,952064              |
| 20    | 37,2     | 4,708               | 22,16526              | 55    | 32,2     | -0,292              | 0,085264              |
| 21    | 36,6     | 4,108               | 16,87566              | 56    | 31,3     | -1,192              | 1,420864              |
| 22    | 26       | -6,492              | 42,14606              | 57    | 25,5     | -6,992              | 48,88806              |
| 23    | 28,1     | -4,392              | 19,28966              | 58    | 40,9     | 8,408               | 70,69446              |
| 24    | 21,7     | -10,792             | 116,4673              | 59    | 15,1     | -17,392             | 302,4817              |
| 25    | 20,9     | -11,592             | 134,3745              | 60    | 18,8     | -13,692             | 187,4709              |
| 26    | 31,9     | -0,592              | 0,350464              | 61    | 41       | 8,508               | 72,38606              |
| 27    | 33,1     | 0,608               | 0,369664              | 62    | 27,5     | -4,992              | 24,92006              |
| 28    | 18,2     | -14,292             | 204,2613              | 63    | 44,9     | 12,408              | 153,9585              |
| 29    | 38,9     | 6,408               | 41,06246              | 64    | 39,3     | 6,808               | 46,34886              |
| 30    | 35,6     | 3,108               | 9,659664              | 65    | 29,5     | -2,992              | 8,952064              |
| 31    | 21,9     | -10,592             | 112,1905              | 66    | 48,1     | 15,608              | 243,6097              |
| 32    | 24,5     | -7,992              | 63,87206              | 67    | 34,3     | 1,808               | 3,268864              |
| 33    | 25,9     | -6,592              | 43,45446              | 68    | 31,9     | -0,592              | 0,350464              |
| 34    | 37,8     | 5,308               | 28,17486              | 69    | 36,6     | 4,108               | 16,87566              |
| 35    | 36,8     | 4,308               | 18,55886              | 70    | 36,7     | 4,208               | 17,70726              |

Продолжение табл. Д.7.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 41,1     | 8,608               | 74,09766              | 86                   | 33,8     | 1,308               | 1,710864              |
| 72    | 48,6     | 16,108              | 259,4677              | 87                   | 35,5     | 3,008               | 9,048064              |
| 73    | 13,7     | -18,792             | 353,1393              | 88                   | 54,1     | 21,608              | 466,9057              |
| 74    | 43,3     | 10,808              | 116,8129              | 89                   | 18,3     | -14,192             | 201,4129              |
| 75    | 29,3     | -3,192              | 10,18886              | 90                   | 47,1     | 14,608              | 213,3937              |
| 76    | 37,4     | 4,908               | 24,08846              | 91                   | 38,5     | 6,008               | 36,09606              |
| 77    | 41,9     | 9,408               | 88,51046              | 92                   | 32,8     | 0,308               | 0,094864              |
| 78    | 29,4     | -3,092              | 9,560464              | 93                   | 34,6     | 2,108               | 4,443664              |
| 79    | 47,7     | 15,208              | 231,2833              | 94                   | 39,4     | 6,908               | 47,72046              |
| 80    | 45,7     | 13,208              | 174,4513              | 95                   | 52,2     | 19,708              | 388,4053              |
| 81    | 36,9     | 4,408               | 19,43046              | 96                   | 44,8     | 12,308              | 151,4869              |
| 82    | 41,4     | 8,908               | 79,35246              | 97                   | 30,2     | -2,292              | 5,253264              |
| 83    | 36,8     | 4,308               | 18,55886              | 98                   | 41,4     | 8,908               | 79,35246              |
| 84    | 45,4     | 12,908              | 166,6165              | 99                   | 29,2     | -3,292              | 10,83726              |
| 85    | 44,9     | 12,408              | 153,9585              | 100                  | 36,5     | 4,008               | 16,06406              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 3249,2   |                     | 8689,167              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 87,76936              |
|       |          |                     |                       | Сред. Квадр-ое откл. |          |                     | 9,36853               |
|       |          |                     |                       | Козф-нт вариации     |          |                     | 0,288333              |

Таблица Д.8. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров закрытого грунта сорта «Верлиока», «Красная стрела» при нагружении жесткими поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 59,2     | 7,594               | 57,66884              | 36    | 38,2     | -13,406             | 179,7208              |
| 2     | 51,4     | -0,206              | 0,042436              | 37    | 61,3     | 9,694               | 93,97364              |
| 3     | 35,5     | -16,106             | 259,4032              | 38    | 54,6     | 2,994               | 8,964036              |
| 4     | 58,8     | 7,194               | 51,75364              | 39    | 53,6     | 1,994               | 3,976036              |
| 5     | 64,5     | 12,894              | 166,2552              | 40    | 32,3     | -19,306             | 372,7216              |
| 6     | 60,5     | 8,894               | 79,10324              | 41    | 57,7     | 6,094               | 37,13684              |
| 7     | 50       | -1,606              | 2,579236              | 42    | 61,1     | 9,494               | 90,13604              |
| 8     | 45,6     | -6,006              | 36,07204              | 43    | 44,5     | -7,106              | 50,49524              |
| 9     | 65,5     | 13,894              | 193,0432              | 44    | 41,4     | -10,206             | 104,1624              |
| 10    | 51,3     | -0,306              | 0,093636              | 45    | 84,9     | 33,294              | 1108,49               |
| 11    | 28,9     | -22,706             | 515,5624              | 46    | 33,9     | -17,706             | 313,5024              |
| 12    | 53,2     | 1,594               | 2,540836              | 47    | 51,9     | 0,294               | 0,086436              |
| 13    | 68,5     | 16,894              | 285,4072              | 48    | 55,6     | 3,994               | 15,95204              |
| 14    | 60,9     | 9,294               | 86,37844              | 49    | 58       | 6,394               | 40,88324              |
| 15    | 53,7     | 2,094               | 4,384836              | 50    | 39,3     | -12,306             | 151,4376              |
| 16    | 44,7     | -6,906              | 47,69284              | 51    | 56,3     | 4,694               | 22,03364              |
| 17    | 53,1     | 1,494               | 2,232036              | 52    | 40,6     | -11,006             | 121,132               |
| 18    | 56,2     | 4,594               | 21,10484              | 53    | 58,6     | 6,994               | 48,91604              |
| 19    | 58,2     | 6,594               | 43,48084              | 54    | 39,4     | -12,206             | 148,9864              |
| 20    | 72,1     | 20,494              | 420,004               | 55    | 70       | 18,394              | 338,3392              |
| 21    | 57,7     | 6,094               | 37,13684              | 56    | 38,1     | -13,506             | 182,412               |
| 22    | 58,1     | 6,494               | 42,17204              | 57    | 32,6     | -19,006             | 361,228               |
| 23    | 54,9     | 3,294               | 10,85044              | 58    | 60,6     | 8,994               | 80,89204              |
| 24    | 71,1     | 19,494              | 380,016               | 59    | 36,6     | -15,006             | 225,18                |
| 25    | 74,5     | 22,894              | 524,1352              | 60    | 73,6     | 21,994              | 483,736               |
| 26    | 59       | 7,394               | 54,67124              | 61    | 45,6     | -6,006              | 36,07204              |
| 27    | 46       | -5,606              | 31,42724              | 62    | 46,1     | -5,506              | 30,31604              |
| 28    | 50,3     | -1,306              | 1,705636              | 63    | 39,9     | -11,706             | 137,0304              |
| 29    | 30,9     | -20,706             | 428,7384              | 64    | 22,4     | -29,206             | 852,9904              |
| 30    | 69,8     | 18,194              | 331,0216              | 65    | 65,1     | 13,494              | 182,088               |
| 31    | 70,3     | 18,694              | 349,4656              | 66    | 68,1     | 16,494              | 272,052               |
| 32    | 34,7     | -16,906             | 285,8128              | 67    | 38,6     | -13,006             | 169,156               |
| 33    | 48,2     | -3,406              | 11,60084              | 68    | 41,4     | -10,206             | 104,1624              |
| 34    | 30       | -21,606             | 466,8192              | 69    | 70,3     | 18,694              | 349,4656              |
| 35    | 39,3     | -12,306             | 151,4376              | 70    | 29,1     | -22,506             | 506,52                |

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 37,5     | -14,106             | 198,9792              | 86                   | 41,7     | -9,906              | 98,12884              |
| 72    | 55,4     | 3,794               | 14,39444              | 87                   | 62,2     | 10,594              | 112,2328              |
| 73    | 63,8     | 12,194              | 148,6936              | 88                   | 58,7     | 7,094               | 50,32484              |
| 74    | 45,1     | -6,506              | 42,32804              | 89                   | 53,9     | 2,294               | 5,262436              |
| 75    | 34,5     | -17,106             | 292,6152              | 90                   | 70,6     | 18,994              | 360,772               |
| 76    | 36,9     | -14,706             | 216,2664              | 91                   | 63,8     | 12,194              | 148,6936              |
| 77    | 72,4     | 20,794              | 432,3904              | 92                   | 59       | 7,394               | 54,67124              |
| 78    | 54,3     | 2,694               | 7,257636              | 93                   | 60,1     | 8,494               | 72,14804              |
| 79    | 46,1     | -5,506              | 30,31604              | 94                   | 49,9     | -1,706              | 2,910436              |
| 80    | 40,8     | -10,806             | 116,7696              | 95                   | 50,8     | -0,806              | 0,649636              |
| 81    | 45,1     | -6,506              | 42,32804              | 96                   | 33       | -18,606             | 346,1832              |
| 82    | 52,2     | 0,594               | 0,352836              | 97                   | 55       | 3,394               | 11,51924              |
| 83    | 43       | -8,606              | 74,06324              | 98                   | 35,5     | -16,106             | 259,4032              |
| 84    | 30,6     | -21,006             | 441,252               | 99                   | 70,6     | 18,994              | 360,772               |
| 85    | 58,8     | 7,194               | 51,75364              | 100                  | 51,4     | -0,206              | 0,042436              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 5160,6   |                     | 16599,64              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 167,67                |
|       |          |                     |                       | Сред. Квадр-ое откл. |          |                     | 12,95                 |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,25                  |

Таблица Е.1. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Атласный» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 74,9     | 8,066               | 65,06036              | 36    | 77,7     | 10,866              | 118,07                |
| 2     | 65,1     | -1,734              | 3,006756              | 37    | 63,5     | -3,334              | 11,11556              |
| 3     | 86,7     | 19,866              | 394,658               | 38    | 85,5     | 18,666              | 348,4196              |
| 4     | 73,2     | 6,366               | 40,52596              | 39    | 75,3     | 8,466               | 71,67316              |
| 5     | 79,7     | 12,866              | 165,534               | 40    | 46,8     | -20,034             | 401,3612              |
| 6     | 75,2     | 8,366               | 69,98996              | 41    | 78,1     | 11,266              | 126,9228              |
| 7     | 74,1     | 7,266               | 52,79476              | 42    | 57,3     | -9,534              | 90,89716              |
| 8     | 48       | -18,834             | 354,7196              | 43    | 57,7     | -9,134              | 83,42996              |
| 9     | 65,2     | -1,634              | 2,669956              | 44    | 76       | 9,166               | 84,01556              |
| 10    | 58,8     | -8,034              | 64,54516              | 45    | 85,4     | 18,566              | 344,6964              |
| 11    | 51,4     | -15,434             | 238,2084              | 46    | 42,7     | -24,134             | 582,45                |
| 12    | 56,6     | -10,234             | 104,7348              | 47    | 54,8     | -12,034             | 144,8172              |
| 13    | 72,7     | 5,866               | 34,40996              | 48    | 73,4     | 6,566               | 43,11236              |
| 14    | 55,3     | -11,534             | 133,0332              | 49    | 83,7     | 16,866              | 284,462               |
| 15    | 79,7     | 12,866              | 165,534               | 50    | 69,4     | 2,566               | 6,584356              |
| 16    | 59,6     | -7,234              | 52,33076              | 51    | 66,1     | -0,734              | 0,538756              |
| 17    | 71,9     | 5,066               | 25,66436              | 52    | 36,1     | -30,734             | 944,5788              |
| 18    | 43,2     | -23,634             | 558,566               | 53    | 55,6     | -11,234             | 126,2028              |
| 19    | 56,3     | -10,534             | 110,9652              | 54    | 69,2     | 2,366               | 5,597956              |
| 20    | 70,5     | 3,666               | 13,43956              | 55    | 37       | -29,834             | 890,0676              |
| 21    | 58       | -8,834              | 78,03956              | 56    | 54,3     | -12,534             | 157,1012              |
| 22    | 48,1     | -18,734             | 350,9628              | 57    | 57       | -9,834              | 96,70756              |
| 23    | 80,5     | 13,666              | 186,7596              | 58    | 91,1     | 24,266              | 588,8388              |
| 24    | 85,2     | 18,366              | 337,31                | 59    | 69,3     | 2,466               | 6,081156              |
| 25    | 89,2     | 22,366              | 500,238               | 60    | 78,5     | 11,666              | 136,0956              |
| 26    | 57,4     | -9,434              | 89,00036              | 61    | 75,6     | 8,766               | 76,84276              |
| 27    | 71,8     | 4,966               | 24,66116              | 62    | 73,7     | 6,866               | 47,14196              |
| 28    | 71,1     | 4,266               | 18,19876              | 63    | 88,2     | 21,366              | 456,506               |
| 29    | 48,1     | -18,734             | 350,9628              | 64    | 87,3     | 20,466              | 418,8572              |
| 30    | 62       | -4,834              | 23,36756              | 65    | 58,9     | -7,934              | 62,94836              |
| 31    | 83,2     | 16,366              | 267,846               | 66    | 70,8     | 3,966               | 15,72916              |
| 32    | 68,1     | 1,266               | 1,602756              | 67    | 53,8     | -13,034             | 169,8852              |
| 33    | 66       | -0,834              | 0,695556              | 68    | 82,7     | 15,866              | 251,73                |
| 34    | 73,6     | 6,766               | 45,77876              | 69    | 71,9     | 5,066               | 25,66436              |

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 35    | 72,7     | 5,866               | 34,40996              | 70                   | 62,6     | -4,234              | 17,92676              |
| 71    | 84,3     | 17,466              | 305,0612              | 86                   | 67,1     | 0,266               | 0,070756              |
| 72    | 55,6     | -11,234             | 126,2028              | 87                   | 56,3     | -10,534             | 110,9652              |
| 73    | 56,4     | -10,434             | 108,8684              | 88                   | 46,6     | -20,234             | 409,4148              |
| 74    | 66,2     | -0,634              | 0,401956              | 89                   | 64,3     | -2,534              | 6,421156              |
| 75    | 61,4     | -5,434              | 29,52836              | 90                   | 70,4     | 3,566               | 12,71636              |
| 76    | 69,2     | 2,366               | 5,597956              | 91                   | 43,7     | -23,134             | 535,182               |
| 77    | 65,5     | -1,334              | 1,779556              | 92                   | 68,6     | 1,766               | 3,118756              |
| 78    | 50,2     | -16,634             | 276,69                | 93                   | 57,6     | -9,234              | 85,26676              |
| 79    | 51,9     | -14,934             | 223,0244              | 94                   | 76,5     | 9,666               | 93,43156              |
| 80    | 84,2     | 17,366              | 301,578               | 95                   | 56,5     | -10,334             | 106,7916              |
| 81    | 64       | -2,834              | 8,031556              | 96                   | 74,5     | 7,666               | 58,76756              |
| 82    | 52,4     | -14,434             | 208,3404              | 97                   | 80,1     | 13,266              | 175,9868              |
| 83    | 58,7     | -8,134              | 66,16196              | 98                   | 49,4     | -17,434             | 303,9444              |
| 84    | 79,2     | 12,366              | 152,918               | 99                   | 75,5     | 8,666               | 75,09956              |
| 85    | 87,1     | 20,266              | 410,7108              | 100                  | 89,9     | 23,066              | 532,0404              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 6683,4   |                     | 16931,4               |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 171,0243              |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 13,07763              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,195673              |

Среднее значение разрушающей нагрузки вычисляем по формуле:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \text{ (в Н)},$$

где:  $P_i$  — значение  $i$ -го измерения (в Н);  $n$  — число измерений.

Выборочная дисперсия

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}.$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}}.$$

Коэффициент вариации

$$V = \frac{S}{\bar{P}}.$$



Таблица Е.2. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Барвинок» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 21,6     | -25,24              | 637,0576              | 36    | 43,8     | -3,04               | 9,2416                |
| 2     | 26,6     | -20,24              | 409,6576              | 37    | 82,7     | 35,86               | 1285,94               |
| 3     | 34,6     | -12,24              | 149,8176              | 38    | 60,4     | 13,56               | 183,8736              |
| 4     | 59,8     | 12,96               | 167,9616              | 39    | 58,1     | 11,26               | 126,7876              |
| 5     | 26,4     | -20,44              | 417,7936              | 40    | 39       | -7,84               | 61,4656               |
| 6     | 56,1     | 9,26                | 85,7476               | 41    | 29,4     | -17,44              | 304,1536              |
| 7     | 34,5     | -12,34              | 152,2756              | 42    | 67,7     | 20,86               | 435,1396              |
| 8     | 81,8     | 34,96               | 1222,202              | 43    | 20,6     | -26,24              | 688,5376              |
| 9     | 36,8     | -10,04              | 100,8016              | 44    | 53,5     | 6,66                | 44,3556               |
| 10    | 68,4     | 21,56               | 464,8336              | 45    | 59,1     | 12,26               | 150,3076              |
| 11    | 22,5     | -24,34              | 592,4356              | 46    | 61,1     | 14,26               | 203,3476              |
| 12    | 27       | -19,84              | 393,6256              | 47    | 26,4     | -20,44              | 417,7936              |
| 13    | 67,4     | 20,56               | 422,7136              | 48    | 87,3     | 40,46               | 1637,012              |
| 14    | 5,4      | -41,44              | 1717,274              | 49    | 42,7     | -4,14               | 17,1396               |
| 15    | 30,5     | -16,34              | 266,9956              | 50    | 56,1     | 9,26                | 85,7476               |
| 16    | 85,7     | 38,86               | 1510,1                | 51    | 61,8     | 14,96               | 223,8016              |
| 17    | 19       | -27,84              | 775,0656              | 52    | 21,3     | -25,54              | 652,2916              |
| 18    | 47,4     | 0,56                | 0,3136                | 53    | 76,6     | 29,76               | 885,6576              |
| 19    | 36,2     | -10,64              | 113,2096              | 54    | 55,8     | 8,96                | 80,2816               |
| 20    | 35,8     | -11,04              | 121,8816              | 55    | 14,7     | -32,14              | 1032,98               |
| 21    | 49,7     | 2,86                | 8,1796                | 56    | 19,5     | -27,34              | 747,4756              |
| 22    | 60,3     | 13,46               | 181,1716              | 57    | 72,2     | 25,36               | 643,1296              |
| 23    | 19       | -27,84              | 775,0656              | 58    | 63,3     | 16,46               | 270,9316              |
| 24    | 62,8     | 15,96               | 254,7216              | 59    | 57,7     | 10,86               | 117,9396              |
| 25    | 57,4     | 10,56               | 111,5136              | 60    | 88,6     | 41,76               | 1743,898              |
| 26    | 46,6     | -0,24               | 0,0576                | 61    | 42,5     | -4,34               | 18,8356               |
| 27    | 50,1     | 3,26                | 10,6276               | 62    | 20,9     | -25,94              | 672,8836              |
| 28    | 22,4     | -24,44              | 597,3136              | 63    | 82,7     | 35,86               | 1285,94               |
| 29    | 34,9     | -11,94              | 142,5636              | 64    | 23,2     | -23,64              | 558,8496              |
| 30    | 82       | 35,16               | 1236,226              | 65    | 23,2     | -23,64              | 558,8496              |
| 31    | 65,2     | 18,36               | 337,0896              | 66    | 76       | 29,16               | 850,3056              |
| 32    | 59,5     | 12,66               | 160,2756              | 67    | 70,1     | 23,26               | 541,0276              |
| 33    | 25,7     | -21,14              | 446,8996              | 68    | 74,1     | 27,26               | 743,1076              |
| 34    | 19,7     | -27,14              | 736,5796              | 69    | 10,1     | -36,74              | 1349,828              |
| 35    | 35,9     | -10,94              | 119,6836              | 70    | 42,4     | -4,44               | 19,7136               |

Продолжение табл. Е.2.

| $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$    | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|----------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71                   | 28,3     | -18,54              | 343,7316              | 86       | 69,5     | 22,66               | 513,4756              |
| 72                   | 49,1     | 2,26                | 5,1076                | 87       | 56,9     | 10,06               | 101,2036              |
| 73                   | 59       | 12,16               | 147,8656              | 88       | 16,1     | -30,74              | 944,9476              |
| 74                   | 58,8     | 11,96               | 143,0416              | 89       | 33,2     | -13,64              | 186,0496              |
| 75                   | 94,3     | 47,46               | 2252,452              | 90       | 82,4     | 35,56               | 1264,514              |
| 76                   | 58       | 11,16               | 124,5456              | 91       | 52,9     | 6,06                | 36,7236               |
| 77                   | 46       | -0,84               | 0,7056                | 92       | 20,9     | -25,94              | 672,8836              |
| 78                   | 44,2     | -2,64               | 6,9696                | 93       | 21,4     | -25,44              | 647,1936              |
| 79                   | 71,4     | 24,56               | 603,1936              | 94       | 30,5     | -16,34              | 266,9956              |
| 80                   | 52,4     | 5,56                | 30,9136               | 95       | 50,1     | 3,26                | 10,6276               |
| 81                   | 21       | -25,84              | 667,7056              | 96       | 9,8      | -37,04              | 1371,962              |
| 82                   | 30,7     | -16,14              | 260,4996              | 97       | 37,3     | -9,54               | 91,0116               |
| 83                   | 49,1     | 2,26                | 5,1076                | 98       | 66,4     | 19,56               | 382,5936              |
| 84                   | 47,7     | 0,86                | 0,7396                | 99       | 62,2     | 15,36               | 235,9296              |
| 85                   | 20,5     | -26,34              | 693,7956              | 100      | 44,6     | -2,24               | 5,0176                |
|                      |          |                     |                       | $\Sigma$ | 4684     |                     | 45505,8               |
| Дисперсия            |          |                     |                       |          |          |                     | 302,6658              |
| Сред. квадр-ое откл. |          |                     |                       |          |          |                     | 17,39729              |
| Коэф-нт вариации     |          |                     |                       |          |          |                     | 0,260306              |

Таблица Е.3. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров закрытого грунта сорта «Кременец» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 30,1     | -17,932             | 321,5566              | 36    | 56,2     | 8,168               | 66,71622              |
| 2     | 58,3     | 10,268              | 105,4318              | 37    | 53,9     | 5,868               | 34,43342              |
| 3     | 32,9     | -15,132             | 228,9774              | 38    | 36,9     | -11,132             | 123,9214              |
| 4     | 44,1     | -3,932              | 15,46062              | 39    | 64,1     | 16,068              | 258,1806              |
| 5     | 55,4     | 7,368               | 54,28742              | 40    | 34       | -14,032             | 196,897               |
| 6     | 65,3     | 17,268              | 298,1838              | 41    | 62,7     | 14,668              | 215,1502              |
| 7     | 55,2     | 7,168               | 51,38022              | 42    | 45,8     | -2,232              | 4,981824              |
| 8     | 51,9     | 3,868               | 14,96142              | 43    | 50,1     | 2,068               | 4,276624              |
| 9     | 54,6     | 6,568               | 43,13862              | 44    | 61       | 12,968              | 168,169               |
| 10    | 53,6     | 5,568               | 31,00262              | 45    | 33,1     | -14,932             | 222,9646              |
| 11    | 50,4     | 2,368               | 5,607424              | 46    | 41,5     | -6,532              | 42,66702              |
| 12    | 59,1     | 11,068              | 122,5006              | 47    | 57,2     | 9,168               | 84,05222              |
| 13    | 12,8     | -35,232             | 1241,294              | 48    | 62,9     | 14,868              | 221,0574              |
| 14    | 58,8     | 10,768              | 115,9498              | 49    | 28,7     | -19,332             | 373,7262              |
| 15    | 55,6     | 7,568               | 57,27462              | 50    | 47,7     | -0,332              | 0,110224              |
| 16    | 65       | 16,968              | 287,913               | 51    | 30,1     | -17,932             | 321,5566              |
| 17    | 56,6     | 8,568               | 73,41062              | 52    | 49,1     | 1,068               | 1,140624              |
| 18    | 63,5     | 15,468              | 239,259               | 53    | 47,4     | -0,632              | 0,399424              |
| 19    | 54,1     | 6,068               | 36,82062              | 54    | 52,5     | 4,468               | 19,96302              |
| 20    | 34,6     | -13,432             | 180,4186              | 55    | 54       | 5,968               | 35,61702              |
| 21    | 58,6     | 10,568              | 111,6826              | 56    | 49,1     | 1,068               | 1,140624              |
| 22    | 59,4     | 11,368              | 129,2314              | 57    | 28,4     | -19,632             | 385,4154              |
| 23    | 50,1     | 2,068               | 4,276624              | 58    | 49       | 0,968               | 0,937024              |
| 24    | 56,9     | 8,868               | 78,64142              | 59    | 28,5     | -19,532             | 381,499               |
| 25    | 58,7     | 10,668              | 113,8062              | 60    | 51,7     | 3,668               | 13,45422              |
| 26    | 52,5     | 4,468               | 19,96302              | 61    | 60,9     | 12,868              | 165,5854              |
| 27    | 67,3     | 19,268              | 371,2558              | 62    | 39,4     | -8,632              | 74,51142              |
| 28    | 50,3     | 2,268               | 5,143824              | 63    | 16,8     | -31,232             | 975,4378              |
| 29    | 38,1     | -9,932              | 98,64462              | 64    | 37,8     | -10,232             | 104,6938              |
| 30    | 37,4     | -10,632             | 113,0394              | 65    | 50,4     | 2,368               | 5,607424              |
| 31    | 45       | -3,032              | 9,193024              | 66    | 37,8     | -10,232             | 104,6938              |
| 32    | 56,4     | 8,368               | 70,02342              | 67    | 45,7     | -2,332              | 5,438224              |
| 33    | 46,5     | -1,532              | 2,347024              | 68    | 47,6     | -0,432              | 0,186624              |
| 34    | 40,1     | -7,932              | 62,91662              | 69    | 47,1     | -0,932              | 0,868624              |
| 35    | 59       | 10,968              | 120,297               | 70    | 59       | 10,968              | 120,297               |

Продолжение табл. Е.3.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 38,6     | -9,432              | 88,96262              | 86                   | 27,3     | -20,732             | 429,8158              |
| 72    | 48,4     | 0,368               | 0,135424              | 87                   | 61       | 12,968              | 168,169               |
| 73    | 61,3     | 13,268              | 176,0398              | 88                   | 20,2     | -27,832             | 774,6202              |
| 74    | 24,4     | -23,632             | 558,4714              | 89                   | 46,8     | -1,232              | 1,517824              |
| 75    | 46,5     | -1,532              | 2,347024              | 90                   | 54,5     | 6,468               | 41,83502              |
| 76    | 46,8     | -1,232              | 1,517824              | 91                   | 39       | -9,032              | 81,57702              |
| 77    | 48,1     | 0,068               | 0,004624              | 92                   | 61,7     | 13,668              | 186,8142              |
| 78    | 63,2     | 15,168              | 230,0682              | 93                   | 17,4     | -30,632             | 938,3194              |
| 79    | 25,6     | -22,432             | 503,1946              | 94                   | 38,6     | -9,432              | 88,96262              |
| 80    | 47,3     | -0,732              | 0,535824              | 95                   | 65,9     | 17,868              | 319,2654              |
| 81    | 53,7     | 5,668               | 32,12622              | 96                   | 55,2     | 7,168               | 51,38022              |
| 82    | 37,2     | -10,832             | 117,3322              | 97                   | 44,9     | -3,132              | 9,809424              |
| 83    | 48,1     | 0,068               | 0,004624              | 98                   | 48,9     | 0,868               | 0,753424              |
| 84    | 55,6     | 7,568               | 57,27462              | 99                   | 64,7     | 16,668              | 277,8222              |
| 85    | 52       | 3,968               | 15,74502              | 100                  | 54       | 5,968               | 35,61702              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 4803,2   |                     | 14761,08              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 149,1018              |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 12,21072              |
|       |          |                     |                       | Кэф-нт вариации      |          |                     | 0,254221              |

Таблица Е.4. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Лагидный» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 35,7     | 1,727               | 2,982529              | 36    | 34       | 0,027               | 0,000729              |
| 2     | 38,1     | 4,127               | 17,03213              | 37    | 35,1     | 1,127               | 1,270129              |
| 3     | 31,7     | -2,273              | 5,166529              | 38    | 44       | 10,027              | 100,5407              |
| 4     | 34,4     | 0,427               | 0,182329              | 39    | 28,7     | -5,273              | 27,80453              |
| 5     | 18,7     | -15,273             | 233,2645              | 40    | 30       | -3,973              | 15,78473              |
| 6     | 43,4     | 9,427               | 88,86833              | 41    | 43,8     | 9,827               | 96,56993              |
| 7     | 27,6     | -6,373              | 40,61513              | 42    | 22,4     | -11,573             | 133,9343              |
| 8     | 36       | 2,027               | 4,108729              | 43    | 32       | -1,973              | 3,892729              |
| 9     | 37,4     | 3,427               | 11,74433              | 44    | 39,5     | 5,527               | 30,54773              |
| 10    | 43       | 9,027               | 81,48673              | 45    | 22,3     | -11,673             | 136,2589              |
| 11    | 33,7     | -0,273              | 0,074529              | 46    | 27,1     | -6,873              | 47,23813              |
| 12    | 31,5     | -2,473              | 6,115729              | 47    | 15,1     | -18,873             | 356,1901              |
| 13    | 33,9     | -0,073              | 0,005329              | 48    | 24,6     | -9,373              | 87,85313              |
| 14    | 46,4     | 12,427              | 154,4303              | 49    | 27,5     | -6,473              | 41,89973              |
| 15    | 39       | 5,027               | 25,27073              | 50    | 35,6     | 1,627               | 2,647129              |
| 16    | 30,5     | -3,473              | 12,06173              | 51    | 41,1     | 7,127               | 50,79413              |
| 17    | 30       | -3,973              | 15,78473              | 52    | 31,9     | -2,073              | 4,297329              |
| 18    | 37,1     | 3,127               | 9,778129              | 53    | 40,4     | 6,427               | 41,30633              |
| 19    | 29,4     | -4,573              | 20,91233              | 54    | 45       | 11,027              | 121,5947              |
| 20    | 25,9     | -8,073              | 65,17333              | 55    | 37,3     | 3,327               | 11,06893              |
| 21    | 40,5     | 6,527               | 42,60173              | 56    | 36,5     | 2,527               | 6,385729              |
| 22    | 45,5     | 11,527              | 132,8717              | 57    | 32,6     | -1,373              | 1,885129              |
| 23    | 40,9     | 6,927               | 47,98333              | 58    | 44,9     | 10,927              | 119,3993              |
| 24    | 37,4     | 3,427               | 11,74433              | 59    | 36,9     | 2,927               | 8,567329              |
| 25    | 33,5     | -0,473              | 0,223729              | 60    | 31,3     | -2,673              | 7,144929              |
| 26    | 20,5     | -13,473             | 181,5217              | 61    | 33,4     | -0,573              | 0,328329              |
| 27    | 29,1     | -4,873              | 23,74613              | 62    | 40,9     | 6,927               | 47,98333              |
| 28    | 30,4     | -3,573              | 12,76633              | 63    | 38,6     | 4,627               | 21,40913              |
| 29    | 48,4     | 14,427              | 208,1383              | 64    | 34,1     | 0,127               | 0,016129              |
| 30    | 33,8     | -0,173              | 0,029929              | 65    | 27,5     | -6,473              | 41,89973              |
| 31    | 26,6     | -7,373              | 54,36113              | 66    | 33,3     | -0,673              | 0,452929              |
| 32    | 29,3     | -4,673              | 21,83693              | 67    | 28,1     | -5,873              | 34,49213              |
| 33    | 35,8     | 1,827               | 3,337929              | 68    | 25,7     | -8,273              | 68,44253              |
| 34    | 35,5     | 1,527               | 2,331729              | 69    | 42,1     | 8,127               | 66,04813              |
| 35    | 56       | 22,027              | 485,1887              | 70    | 33,4     | -0,573              | 0,328329              |

Продолжение табл. Е.4.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 39,4     | 5,427               | 29,45233              | 86                   | 23,6     | -10,373             | 107,5991              |
| 72    | 41,8     | 7,827               | 61,26193              | 87                   | 23,3     | -10,673             | 113,9129              |
| 73    | 37,5     | 3,527               | 12,43973              | 88                   | 32,9     | -1,073              | 1,151329              |
| 74    | 22,4     | -11,573             | 133,9343              | 89                   | 36,5     | 2,527               | 6,385729              |
| 75    | 23,6     | -10,373             | 107,5991              | 90                   | 21,8     | -12,173             | 148,1819              |
| 76    | 29,1     | -4,873              | 23,74613              | 91                   | 43,1     | 9,127               | 83,30213              |
| 77    | 35,8     | 1,827               | 3,337929              | 92                   | 24,5     | -9,473              | 89,73773              |
| 78    | 40,7     | 6,727               | 45,25253              | 93                   | 45,3     | 11,327              | 128,3009              |
| 79    | 38,8     | 4,827               | 23,29993              | 94                   | 45,7     | 11,727              | 137,5225              |
| 80    | 33,1     | -0,873              | 0,762129              | 95                   | 28,9     | -5,073              | 25,73533              |
| 81    | 32       | -1,973              | 3,892729              | 96                   | 42,2     | 8,227               | 67,68353              |
| 82    | 27,1     | -6,873              | 47,23813              | 97                   | 42,3     | 8,327               | 69,33893              |
| 83    | 29,9     | -4,073              | 16,58933              | 98                   | 30,9     | -3,073              | 9,443329              |
| 84    | 40,2     | 6,227               | 38,77553              | 99                   | 29,3     | -4,673              | 21,83693              |
| 85    | 24,4     | -9,573              | 91,64233              | 100                  | 27,9     | -6,073              | 36,88133              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 3397,3   |                     | 5446,257              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 55,0127               |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 7,417055              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,218322              |

Таблица Е.5. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «V-5 F1» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 62,9     | 12,4851             | 155,8777              | 36    | 48,6     | -1,8149             | 3,293862              |
| 2     | 62,6     | 12,1851             | 148,4767              | 37    | 64,8     | 14,3851             | 206,9311              |
| 3     | 31,1     | -19,3149            | 373,0654              | 38    | 55,3     | 4,8851              | 23,8642               |
| 4     | 50,1     | -0,3149             | 0,099162              | 39    | 42,9     | -7,5149             | 56,47372              |
| 5     | 61,6     | 11,1851             | 125,1065              | 40    | 64       | 13,5851             | 184,5549              |
| 6     | 35,9     | -14,5149            | 210,6823              | 41    | 48,5     | -1,9149             | 3,666842              |
| 7     | 47,4     | -3,0149             | 9,089622              | 42    | 53,8     | 3,3851              | 11,4589               |
| 8     | 44,4     | -6,0149             | 36,17902              | 43    | 49,1     | -1,3149             | 1,728962              |
| 9     | 45,2     | -5,2149             | 27,19518              | 44    | 66,1     | 15,6851             | 246,0224              |
| 10    | 56,6     | 6,1851              | 38,25546              | 45    | 57,5     | 7,0851              | 50,19864              |
| 11    | 52,3     | 1,8851              | 3,553602              | 46    | 55,2     | 4,7851              | 22,89718              |
| 12    | 51,3     | 0,8851              | 0,783402              | 47    | 62,3     | 11,8851             | 141,2556              |
| 13    | 62,2     | 11,7851             | 138,8886              | 48    | 46,9     | -3,5149             | 12,35452              |
| 14    | 54       | 3,5851              | 12,85294              | 49    | 52,1     | 1,6851              | 2,839562              |
| 15    | 65,7     | 15,2851             | 233,6343              | 50    | 52,7     | 2,2851              | 5,221682              |
| 16    | 54,8     | 4,3851              | 19,2291               | 51    | 42,2     | -8,2149             | 67,48458              |
| 17    | 46,8     | -3,6149             | 13,0675               | 52    | 46,4     | -4,0149             | 16,11942              |
| 18    | 56,6     | 6,1851              | 38,25546              | 53    | 36,1     | -14,3149            | 204,9164              |
| 19    | 56,2     | 5,7851              | 33,46738              | 54    | 60,7     | 10,2851             | 105,7833              |
| 20    | 41,8     | -8,6149             | 74,2165               | 55    | 57,7     | 7,2851              | 53,07268              |
| 21    | 47,8     | -2,6149             | 6,837702              | 56    | 65,2     | 14,7851             | 218,5992              |
| 22    | 63,9     | 13,4851             | 181,8479              | 57    | 41,4     | -9,0149             | 81,26842              |
| 23    | 59,4     | 8,9851              | 80,73202              | 58    | 53,6     | 3,1851              | 10,14486              |
| 24    | 45,1     | -5,3149             | 28,24816              | 59    | 36,7     | -13,7149            | 188,0985              |
| 25    | 55       | 4,5851              | 21,02314              | 60    | 56,6     | 6,1851              | 38,25546              |
| 26    | 40,9     | -9,5149             | 90,53332              | 61    | 53       | 2,5851              | 6,682742              |
| 27    | 48,7     | -1,7149             | 2,940882              | 62    | 45,7     | -4,7149             | 22,23028              |
| 28    | 34,9     | -15,5149            | 240,7121              | 63    | 43,8     | -6,6149             | 43,7569               |
| 29    | 46,7     | -3,7149             | 13,80048              | 64    | 33,3     | -17,1149            | 292,9198              |
| 30    | 60,1     | 9,6851              | 93,80116              | 65    | 41,2     | -9,2149             | 84,91438              |
| 31    | 53,3     | 2,8851              | 8,323802              | 66    | 38,6     | -11,8149            | 139,5919              |
| 32    | 56,2     | 5,7851              | 33,46738              | 67    | 58,6     | 8,1851              | 66,99586              |
| 33    | 56,9     | 6,4851              | 42,05652              | 68    | 55,5     | 5,0851              | 25,85824              |
| 34    | 36,8     | -13,6149            | 185,3655              | 69    | 37,5     | -12,9149            | 166,7946              |
| 35    | 51,1     | 0,6851              | 0,469362              | 70    | 40,8     | -9,6149             | 92,4463               |

Продолжение табл. Е.5.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 47,3     | -3,1149             | 9,702602              | 86                   | 52,6     | 2,1851              | 4,774662              |
| 72    | 36,6     | -13,8149            | 190,8515              | 87                   | 53,1     | 2,6851              | 7,209762              |
| 73    | 42,1     | -8,3149             | 69,13756              | 88                   | 62,4     | 11,9851             | 143,6426              |
| 74    | 55,4     | 4,9851              | 24,85122              | 89                   | 37,9     | -12,5149            | 156,6227              |
| 75    | 47,8     | -2,6149             | 6,837702              | 90                   | 31,2     | -19,2149            | 369,2124              |
| 76    | 44,9     | -5,5149             | 30,41412              | 91                   | 58,7     | 8,2851              | 68,64288              |
| 77    | 57,9     | 7,4851              | 56,02672              | 92                   | 59,3     | 8,8851              | 78,945                |
| 78    | 46,1     | -4,3149             | 18,61836              | 93                   | 41,4     | -9,0149             | 81,26842              |
| 79    | 50,5     | 0,0851              | 0,007242              | 94                   | 57,6     | 7,1851              | 51,62566              |
| 80    | 38,7     | -11,7149            | 137,2389              | 95                   | 42,9     | -7,5149             | 56,47372              |
| 81    | 57,1     | 6,6851              | 44,69056              | 96                   | 61,6     | 11,1851             | 125,1065              |
| 82    | 59,4     | 8,9851              | 80,73202              | 97                   | 44,89    | -5,5249             | 30,52452              |
| 83    | 46,4     | -4,0149             | 16,11942              | 98                   | 61,6     | 11,1851             | 125,1065              |
| 84    | 37,8     | -12,6149            | 159,1357              | 99                   | 53,4     | 2,9851              | 8,910822              |
| 85    | 51,3     | 0,8851              | 0,783402              | 100                  | 42,9     | -7,5149             | 56,47372              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 5041,49  |                     | 7830,518              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 79,09614              |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 8,893601              |
|       |          |                     |                       | Коэф-нт вариации     |          |                     | 0,176408              |



Таблица Е.6. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Серпневый» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 47       | -0,212              | 0,044944              | 36    | 49,5     | 2,288               | 5,234944              |
| 2     | 61,3     | 14,088              | 198,4717              | 37    | 9,9      | -37,312             | 1392,185              |
| 3     | 70,8     | 23,588              | 556,3937              | 38    | 32,7     | -14,512             | 210,5981              |
| 4     | 58,5     | 11,288              | 127,4189              | 39    | 45,3     | -1,912              | 3,655744              |
| 5     | 16,6     | -30,612             | 937,0945              | 40    | 44,5     | -2,712              | 7,354944              |
| 6     | 35,4     | -11,812             | 139,5233              | 41    | 58,4     | 11,188              | 125,1713              |
| 7     | 52,8     | 5,588               | 31,22574              | 42    | 28,3     | -18,912             | 357,6637              |
| 8     | 46,5     | -0,712              | 0,506944              | 43    | 36,8     | -10,412             | 108,4097              |
| 9     | 83,7     | 36,488              | 1331,374              | 44    | 46,7     | -0,512              | 0,262144              |
| 10    | 37,3     | -9,912              | 98,24774              | 45    | 27,8     | -19,412             | 376,8257              |
| 11    | 32,5     | -14,712             | 216,4429              | 46    | 34       | -13,212             | 174,5569              |
| 12    | 58,7     | 11,488              | 131,9741              | 47    | 26,7     | -20,512             | 420,7421              |
| 13    | 40,1     | -7,112              | 50,58054              | 48    | 46,3     | -0,912              | 0,831744              |
| 14    | 55,9     | 8,688               | 75,48134              | 49    | 17,5     | -29,712             | 882,8029              |
| 15    | 32,2     | -15,012             | 225,3601              | 50    | 39,2     | -8,012              | 64,19214              |
| 16    | 46,2     | -1,012              | 1,024144              | 51    | 31,8     | -15,412             | 237,5297              |
| 17    | 22,9     | -24,312             | 591,0733              | 52    | 44,4     | -2,812              | 7,907344              |
| 18    | 61,1     | 13,888              | 192,8765              | 53    | 25,1     | -22,112             | 488,9405              |
| 19    | 54,6     | 7,388               | 54,58254              | 54    | 59,8     | 12,588              | 158,4577              |
| 20    | 75,6     | 28,388              | 805,8785              | 55    | 25,7     | -21,512             | 462,7661              |
| 21    | 68,1     | 20,888              | 436,3085              | 56    | 52,4     | 5,188               | 26,91534              |
| 22    | 48,1     | 0,888               | 0,788544              | 57    | 24,7     | -22,512             | 506,7901              |
| 23    | 75,1     | 27,888              | 777,7405              | 58    | 76,3     | 29,088              | 846,1117              |
| 24    | 55,6     | 8,388               | 70,35854              | 59    | 18,3     | -28,912             | 835,9037              |
| 25    | 40,1     | -7,112              | 50,58054              | 60    | 66       | 18,788              | 352,9889              |
| 26    | 14,7     | -32,512             | 1057,03               | 61    | 30,9     | -16,312             | 266,0813              |
| 27    | 66,1     | 18,888              | 356,7565              | 62    | 68,2     | 20,988              | 440,4961              |
| 28    | 68,6     | 21,388              | 457,4465              | 63    | 35,2     | -12,012             | 144,2881              |
| 29    | 30,5     | -16,712             | 279,2909              | 64    | 43,2     | -4,012              | 16,09614              |
| 30    | 67,1     | 19,888              | 395,5325              | 65    | 55,4     | 8,188               | 67,04334              |
| 31    | 54,4     | 7,188               | 51,66734              | 66    | 71,4     | 24,188              | 585,0593              |
| 32    | 66,2     | 18,988              | 360,5441              | 67    | 28,1     | -19,112             | 365,2685              |
| 33    | 39,7     | -7,512              | 56,43014              | 68    | 31,7     | -15,512             | 240,6221              |
| 34    | 62,3     | 15,088              | 227,6477              | 69    | 71,6     | 24,388              | 594,7745              |
| 35    | 41,1     | -6,112              | 37,35654              | 70    | 79,4     | 32,188              | 1036,067              |

Продолжение табл. Е.6.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$    | $P_i(H)$             | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 46,6     | -0,612              | 0,374544              | 86       | 45,4                 | -1,812              | 3,283344              |
| 72    | 25,6     | -21,612             | 467,0785              | 87       | 68,4                 | 21,188              | 448,9313              |
| 73    | 29,5     | -17,712             | 313,7149              | 88       | 55,2                 | 7,988               | 63,80814              |
| 74    | 35,3     | -11,912             | 141,8957              | 89       | 55,9                 | 8,688               | 75,48134              |
| 75    | 39,1     | -8,112              | 65,80454              | 90       | 52,5                 | 5,288               | 27,96294              |
| 76    | 63,1     | 15,888              | 252,4285              | 91       | 27,4                 | -19,812             | 392,5153              |
| 77    | 63,1     | 15,888              | 252,4285              | 92       | 52,4                 | 5,188               | 26,91534              |
| 78    | 62,4     | 15,188              | 230,6753              | 93       | 56,5                 | 9,288               | 86,26694              |
| 79    | 51,9     | 4,688               | 21,97734              | 94       | 19,3                 | -27,912             | 779,0797              |
| 80    | 63,2     | 15,988              | 255,6161              | 95       | 69,2                 | 21,988              | 483,4721              |
| 81    | 35,5     | -11,712             | 137,1709              | 96       | 45,7                 | -1,512              | 2,286144              |
| 82    | 21,1     | -26,112             | 681,8365              | 97       | 57,5                 | 10,288              | 105,8429              |
| 83    | 61,9     | 14,688              | 215,7373              | 98       | 43,6                 | -3,612              | 13,04654              |
| 84    | 52,8     | 5,588               | 31,22574              | 99       | 60,4                 | 13,188              | 173,9233              |
| 85    | 49,1     | 1,888               | 3,564544              | 100      | 41                   | -6,212              | 38,58894              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$ | 4721,2               |                     | 27984,59              |
|       |          |                     |                       |          | Дисперсия            |                     | 282,6726              |
|       |          |                     |                       |          | Сред. квадр-ое откл. |                     | 16,81287              |
|       |          |                     |                       |          | Коэф-нт вариации     |                     | 0,356114              |

Таблица Е.7. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров открытого грунта сорта «Флора» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 46,9     | 4,791               | 22,95368              | 36    | 38,8     | -3,309              | 10,94948              |
| 2     | 37,7     | -4,409              | 19,43928              | 37    | 32,6     | -9,509              | 90,42108              |
| 3     | 41,1     | -1,009              | 1,018081              | 38    | 49       | 6,891               | 47,48588              |
| 4     | 23,5     | -18,609             | 346,2949              | 39    | 44,5     | 2,391               | 5,716881              |
| 5     | 28,1     | -14,009             | 196,2521              | 40    | 53       | 10,891              | 118,6139              |
| 6     | 38,1     | -4,009              | 16,07208              | 41    | 46,1     | 3,991               | 15,92808              |
| 7     | 34,8     | -7,309              | 53,42148              | 42    | 36,2     | -5,909              | 34,91628              |
| 8     | 24,3     | -17,809             | 317,1605              | 43    | 23,5     | -18,609             | 346,2949              |
| 9     | 57,7     | 15,591              | 243,0793              | 44    | 39,6     | -2,509              | 6,295081              |
| 10    | 44,1     | 1,991               | 3,964081              | 45    | 41,5     | -0,609              | 0,370881              |
| 11    | 45,2     | 3,091               | 9,554281              | 46    | 41,2     | -0,909              | 0,826281              |
| 12    | 49,1     | 6,991               | 48,87408              | 47    | 43,1     | 0,991               | 0,982081              |
| 13    | 34       | -8,109              | 65,75588              | 48    | 56,6     | 14,491              | 209,9891              |
| 14    | 31,5     | -10,609             | 112,5509              | 49    | 42,8     | 0,691               | 0,477481              |
| 15    | 25,6     | -16,509             | 272,5471              | 50    | 39,7     | -2,409              | 5,803281              |
| 16    | 46,2     | 4,091               | 16,73628              | 51    | 55,5     | 13,391              | 179,3189              |
| 17    | 40,2     | -1,909              | 3,644281              | 52    | 51,1     | 8,991               | 80,83808              |
| 18    | 36,2     | -5,909              | 34,91628              | 53    | 44,2     | 2,091               | 4,372281              |
| 19    | 25,2     | -16,909             | 285,9143              | 54    | 39,8     | -2,309              | 5,331481              |
| 20    | 32,6     | -9,509              | 90,42108              | 55    | 38,2     | -3,909              | 15,28028              |
| 21    | 41,6     | -0,509              | 0,259081              | 56    | 58,2     | 16,091              | 258,9203              |
| 22    | 26,9     | -15,209             | 231,3137              | 57    | 37,3     | -4,809              | 23,12648              |
| 23    | 45,6     | 3,491               | 12,18708              | 58    | 49,1     | 6,991               | 48,87408              |
| 24    | 53,2     | 11,091              | 123,0103              | 59    | 39,7     | -2,409              | 5,803281              |
| 25    | 37,7     | -4,409              | 19,43928              | 60    | 52       | 9,891               | 97,83188              |
| 26    | 58,6     | 16,491              | 271,9531              | 61    | 45,9     | 3,791               | 14,37168              |
| 27    | 34,6     | -7,509              | 56,38508              | 62    | 32,5     | -9,609              | 92,33288              |
| 28    | 36,2     | -5,909              | 34,91628              | 63    | 56,6     | 14,491              | 209,9891              |
| 29    | 29,6     | -12,509             | 156,4751              | 64    | 37,3     | -4,809              | 23,12648              |
| 30    | 27,8     | -14,309             | 204,7475              | 65    | 41,6     | -0,509              | 0,259081              |
| 31    | 42,3     | 0,191               | 0,036481              | 66    | 62,1     | 19,991              | 399,6401              |
| 32    | 39,8     | -2,309              | 5,331481              | 67    | 35       | -7,109              | 50,53788              |
| 33    | 44       | 1,891               | 3,575881              | 68    | 53,3     | 11,191              | 125,2385              |
| 34    | 59,2     | 17,091              | 292,1023              | 69    | 45       | 2,891               | 8,357881              |
| 35    | 35,2     | -6,909              | 47,73428              | 70    | 60,9     | 18,791              | 353,1017              |

Продолжение табл. Е.7.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$                | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 44,7     | 2,591               | 6,713281              | 86                   | 52,2     | 10,091              | 101,8283              |
| 72    | 49,5     | 7,391               | 54,62688              | 87                   | 61,3     | 19,191              | 368,2945              |
| 73    | 36,4     | -5,709              | 32,59268              | 88                   | 46,4     | 4,291               | 18,41268              |
| 74    | 26,2     | -15,909             | 253,0963              | 89                   | 32,4     | -9,709              | 94,26468              |
| 75    | 42,9     | 0,791               | 0,625681              | 90                   | 47,2     | 5,091               | 25,91828              |
| 76    | 41,4     | -0,709              | 0,502681              | 91                   | 31,3     | -10,809             | 116,8345              |
| 77    | 29,8     | -12,309             | 151,5115              | 92                   | 32,1     | -10,009             | 100,1801              |
| 78    | 47,2     | 5,091               | 25,91828              | 93                   | 56,6     | 14,491              | 209,9891              |
| 79    | 31,9     | -10,209             | 104,2237              | 94                   | 34,4     | -7,709              | 59,42868              |
| 80    | 39,7     | -2,409              | 5,803281              | 95                   | 55,6     | 13,491              | 182,0071              |
| 81    | 42,7     | 0,591               | 0,349281              | 96                   | 32,6     | -9,509              | 90,42108              |
| 82    | 36,5     | -5,609              | 31,46088              | 97                   | 43,7     | 1,591               | 2,531281              |
| 83    | 53,6     | 11,491              | 132,0431              | 98                   | 26,9     | -15,209             | 231,3137              |
| 84    | 53,9     | 11,791              | 139,0277              | 99                   | 51,1     | 8,991               | 80,83808              |
| 85    | 64       | 21,891              | 479,2159              | 100                  | 48,8     | 6,691               | 44,76948              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$             | 4210,9   |                     | 9656,502              |
|       |          |                     |                       | Дисперсия            |          |                     | 97,54042              |
|       |          |                     |                       | Сред. квадр-ое откл. |          |                     | 9,876256              |
|       |          |                     |                       | Коэф -нт вариации    |          |                     | 0,23454               |

Таблица Е.8. Результаты разрушающей нагрузки плодов помидоров закрытого грунта сорта «Верлиока», «Красная стрела» при нагружении эластичными поверхностями

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 65,9     | 3,1671              | 10,03052              | 36    | 67,8     | 5,0671              | 25,6755               |
| 2     | 61,8     | -0,9329             | 0,870302              | 37    | 47,6     | -15,132             | 229,0047              |
| 3     | 96,3     | 33,5671             | 1126,75               | 38    | 54,5     | -8,2329             | 67,78064              |
| 4     | 56,7     | -6,0329             | 36,39588              | 39    | 36,9     | -25,832             | 667,3387              |
| 5     | 70,9     | 8,1671              | 66,70152              | 40    | 51,5     | -11,232             | 126,178               |
| 6     | 53,3     | -9,4329             | 88,9796               | 41    | 65,5     | 2,7671              | 7,656842              |
| 7     | 57,7     | -5,0329             | 25,33008              | 42    | 70,9     | 8,1671              | 66,70152              |
| 8     | 50,2     | -12,532             | 157,0736              | 43    | 91,1     | 28,3671             | 804,6924              |
| 9     | 73,7     | 10,9671             | 120,2773              | 44    | 30,9     | -31,832             | 1013,334              |
| 10    | 94,7     | 31,9671             | 1021,895              | 45    | 84       | 21,2671             | 452,2895              |
| 11    | 70,7     | 7,9671              | 63,47468              | 46    | 54,5     | -8,2329             | 67,78064              |
| 12    | 49,6     | -13,132             | 172,4731              | 47    | 42,9     | -19,832             | 393,3439              |
| 13    | 67,1     | 4,3671              | 19,07156              | 48    | 73,2     | 10,4671             | 109,5602              |
| 14    | 44,1     | -18,632             | 347,185               | 49    | 27,4     | -35,332             | 1248,414              |
| 15    | 55,2     | -7,5329             | 56,74458              | 50    | 52,6     | -10,132             | 102,6757              |
| 16    | 68,8     | 6,0671              | 36,8097               | 51    | 50,2     | -12,532             | 157,0736              |
| 17    | 62       | -0,7329             | 0,537142              | 52    | 46,8     | -15,932             | 253,8573              |
| 18    | 57,4     | -5,3329             | 28,43982              | 53    | 64,1     | 1,3671              | 1,868962              |
| 19    | 72,3     | 9,5671              | 91,5294               | 54    | 55,9     | -6,8329             | 46,68852              |
| 20    | 61,5     | -1,2329             | 1,520042              | 55    | 47,8     | -14,932             | 222,9915              |
| 21    | 88       | 25,2671             | 638,4263              | 56    | 92,4     | 29,6671             | 880,1368              |
| 22    | 73,5     | 10,7671             | 115,9304              | 57    | 50,5     | -12,232             | 149,6438              |
| 23    | 88,5     | 25,7671             | 663,9434              | 58    | 69       | 6,2671              | 39,27654              |
| 24    | 43       | -19,732             | 389,3873              | 59    | 67,6     | 4,8671              | 23,68866              |
| 25    | 43,6     | -19,132             | 366,0679              | 60    | 69,2     | 6,4671              | 41,82338              |
| 26    | 79,9     | 17,1671             | 294,7093              | 61    | 46,3     | -16,432             | 270,0402              |
| 27    | 93,3     | 30,5671             | 934,3476              | 62    | 81,4     | 18,6671             | 348,4606              |
| 28    | 74,3     | 11,5671             | 133,7978              | 63    | 75,6     | 12,8671             | 165,5623              |
| 29    | 43,4     | -19,332             | 373,761               | 64    | 76,9     | 14,1671             | 200,7067              |
| 30    | 46,1     | -16,632             | 276,6534              | 65    | 64,9     | 2,1671              | 4,696322              |
| 31    | 55,4     | -7,3329             | 53,77142              | 66    | 72       | 9,2671              | 85,87914              |
| 32    | 53,7     | -9,0329             | 81,59328              | 67    | 40,2     | -22,532             | 507,7316              |
| 33    | 55,6     | -7,1329             | 50,87826              | 68    | 33,9     | -28,832             | 831,3361              |
| 34    | 57,8     | -4,9329             | 24,3335               | 69    | 66,3     | 3,5671              | 12,7242               |
| 35    | 74,6     | 11,8671             | 140,8281              | 70    | 83,6     | 20,8671             | 435,4359              |

Продолжение табл.Е.8.

| $n_i$ | $P_i(H)$ | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ | $n_i$    | $P_i(H)$             | $(P_i - \bar{P}_i)$ | $(P_i - \bar{P}_i)^2$ |
|-------|----------|---------------------|-----------------------|----------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 71    | 50,6     | -12,132             | 147,2073              | 86       | 60,6                 | -2,1329             | 4,549262              |
| 72    | 42,6     | -20,132             | 405,3337              | 87       | 59,5                 | -3,2329             | 10,45164              |
| 73    | 57,6     | -5,1329             | 26,34666              | 88       | 66,3                 | 3,5671              | 12,7242               |
| 74    | 71,4     | 8,6671              | 75,11862              | 89       | 32                   | -30,732             | 944,5111              |
| 75    | 64,9     | 2,1671              | 4,696322              | 90       | 79,9                 | 17,1671             | 294,7093              |
| 76    | 58,3     | -4,4329             | 19,6506               | 91       | 53,8                 | -8,9329             | 79,7967               |
| 77    | 75       | 12,2671             | 150,4817              | 92       | 47,2                 | -15,532             | 241,271               |
| 78    | 94       | 31,2671             | 977,6315              | 93       | 72,7                 | 9,9671              | 99,34308              |
| 79    | 83,5     | 20,7671             | 431,2724              | 94       | 57,9                 | -4,8329             | 23,35692              |
| 80    | 66,5     | 3,7671              | 14,19104              | 95       | 82,8                 | 20,0671             | 402,6885              |
| 81    | 58,1     | -4,6329             | 21,46376              | 96       | 64,6                 | 1,8671              | 3,486062              |
| 82    | 91,7     | 28,9671             | 839,0929              | 97       | 43,49                | -19,242             | 370,2892              |
| 83    | 68,2     | 5,4671              | 29,88918              | 98       | 46,5                 | -16,232             | 263,507               |
| 84    | 73,8     | 11,0671             | 122,4807              | 99       | 62,6                 | -0,1329             | 0,017662              |
| 85    | 84,4     | 21,6671             | 469,4632              | 100      | 36,3                 | -26,432             | 698,6982              |
|       |          |                     |                       | $\Sigma$ | 6273,2               |                     | 25256,9               |
|       |          |                     |                       |          | Дисперсия            |                     | 255,114               |
|       |          |                     |                       |          | Сред. квадр-ое откл. |                     | 15,9729               |
|       |          |                     |                       |          | Коэф-нт вариации     |                     | 0,2546                |

Таблица Ж.1. Результаты экспериментальной оценки связи между величиной  $\delta$  коэффициента деформации плодов томатов и величиной  $I_{u0}$  (в кг) статического силового воздействия на них, когда сжатие осуществлялось между двумя жесткими пластинами из сухого органического стекла (коэффициент внешнего трения  $f = 0,51$ )

| Плод | Измеряемые величины             |                      |                   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|---------------------------------|----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | Начальный диаметр, $D_0$ (в мм) | Условные обозначения | Числовые значения |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1    | 46                              | $I_{u0}$             | 0                 | 0,65 | 1,42 | 2,32 | 3,35 | 4,19 |      |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,91 | 0,87 | 0,83 | 0,78 |      |      |      |
| 2    | 55                              | $I_{u0}$             | 0                 | 0,90 | 1,81 | 2,90 | 3,87 | 4,71 | 5,68 |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,82 | 0,78 |      |      |
| 3    | 53                              | $I_{u0}$             | 0                 | 0,84 | 1,74 | 2,45 | 3,23 | 4,13 | 4,90 | 5,61 | 6,39 |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,92 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,77 | 0,74 | 0,70 |
| 4    | 54                              | $I_{u0}$             | 0                 | 1,23 | 2,19 | 3,03 | 4,00 | 4,90 | 5,87 |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,78 |      |      |
| 5    | 54                              | $I_{u0}$             | 0                 | 0,97 | 1,61 | 2,58 | 3,55 | 3,87 |      |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,81 |      |      |      |
| 6    | 53                              | $I_{u0}$             | 0                 | 1,16 | 2,06 | 2,84 | 3,55 | 4,19 | 4,97 |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,92 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,77 |      |      |
| 7    | 54                              | $I_{u0}$             | 0                 | 0,97 | 1,74 | 2,58 | 3,48 | 4,52 |      |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,81 |      |      |      |
| 8    | 53                              | $I_{u0}$             | 0                 | 1,03 | 2,06 | 2,90 | 4,00 | 4,71 | 5,48 | 6,32 | 6,97 |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,92 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,77 | 0,74 | 0,70 |
| 9    | 55                              | $I_{u0}$             | 0                 | 1,16 | 1,94 | 2,71 | 3,55 | 4,39 | 4,84 |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,82 | 0,78 |      |      |
| 10   | 59                              | $I_{u0}$             | 0                 | 1,16 | 1,94 | 2,71 | 3,87 | 4,65 | 5,48 |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,97 | 0,93 | 0,90 | 0,86 | 0,83 | 0,80 |      |      |
| 11   | 45                              | $I_{u0}$             | 0                 | 1,61 | 2,71 | 4,00 | 4,71 | 5,94 | 6,58 |      |      |
|      |                                 | $\delta$             | 1                 | 0,96 | 0,91 | 0,87 | 0,82 | 0,78 | 0,73 |      |      |