

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕКСТИЛЬНОЙ  
И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**С.Ш.ТАШПУЛАТОВ**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ ОБОЛОЧЕК  
ЦЕЛЬНОВЫКРОЕННЫХ  
ДЕТАЛЕЙ ОДЕЖДЫ  
(Второе издание)**

**ТАШКЕНТ - 2010**

**С.Ш.Ташпулатов**

Напряженно-деформированное состояние оболочек цельновыкроенных деталей одежды. – Ташкент.: «ФАН», 2010. - 90 с.

Монография посвящена вопросам исследования напряженно-деформированного состояния оболочек деталей одежды, изготавливаемых на основе новых высокоэффективных ресурсосберегающих технологий. В нем рассмотрены способы проектирования и получения плоско-объемных оболочек полуфабрикатов деталей и узлов одежды из тканых полотен, на основе которых разработаны принципиально новые технологические процессы изготовления швейных изделий. Рассмотрены вопросы деформирования сетчатой структуры ткани при формообразовании и разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния оболочек цельновыкроенных деталей одежды при их формообразовании.

Монография предназначена для научно-технических и инженерно-технических работников, профессорско-преподавательского состава ВУЗов, аспирантов, магистров и студентов институтов технологии легкой промышленности.

**Рецензенты:** доктор технических наук, профессор **М.М.Мукимов**  
доктор технических наук, профессор **А.З.Маматов**

**Отв. редакторы:**  
заслуженный изобретатель Российской Федерации  
доктор технических наук, профессор,  
**А.П.Черепенько**  
доктор технических наук, профессор **М.Э.Эргашов**

Печатается по решению Ученого совета  
Ташкентского института текстильной и легкой промышленности

Протокол № \_\_- от \_\_\_\_\_ 2010 года

**Посвящается памяти моих учителей**  
д.т.н., проф. **Е.Б.Кобляковой** и д.т.н., проф. **Е.Х.Меликова**

© Издательство «Фан ва технология» – 2008

© Издательство «ФАН» – 2010

## ***Введение***

Методы проектирования и изготовления одежды из тканых материалов ориентированы в основном на использовании при её производстве существующего парка оборудования швейных предприятий.

В настоящее время появились принципиально новые методы изготовления одежды, основанные на более глубоком изучении физико-механических свойств основных и прикладных материалов для одежды, требующие кардинального изменения к подходу проектирования и создания принципиально новой технологии для её изготовления. Среди них: изготовление деталей и узлов швейных изделий из цельновыкроенных полуфабрикатов на специальном оборудовании [1-4, 9-14], используя формовочные свойства тканей, а также получение цельнотканых полуфабрикатов одежды и узлов непосредственно на ткацком оборудовании [5-8]. Эти методы отличаются высокой эффективностью производства, экономией энергетических ресурсов, сырья и материалов, сокращением многочисленных технологических операций на различных этапах производства швейных изделий, за счет чего значительно снижается их трудоемкость и себестоимость. Особой отличительностью новых ресурсосберегающих технологических процессов является создание предпосылок к переходу автоматизированным производствам швейных изделий с широким использованием робототехники.

Монография посвящена вопросам изучения напряженно-деформированного состояния оболочек цельновыкроенных деталей одежды, изготавливаемых по новой ресурсосберегающей технологии, основанной на использовании свойств сетчатой структуры текстильных материалов.

Автор выражает признательность докт.техн.наук, проф. М.М.Мукимову и докт.техн.наук, проф. А.З.Маматову за критические замечания и помощь, оказанную при рецензировании рукописи. Особая благодарность докт.техн.наук, проф. А.П.Черепенько, докт.техн.наук, проф. М.Э.Эргашову за редактирование монографии, ценные советы и замечания при проведении теоретических исследований и плодотворные совместные обсуждения их результатов.

## ***1.Механизм формообразования цельновыкроенных деталей одежды***

Для достижения высокой формоустойчивости цельновыкроенных деталей, способы их формования должны обеспечивать качественное формообразование за счет изменения геометрии сети ткани и фиксацию положения нитей в многослойных деталях одежды путем рациональной ориентации клеевой армирующей прокладки в пакете деталей, а в однослойных деталях – путем использования химически активных рабочих сред.

Геометрия оболочек из сетчатой структуры ткани изучена достаточно глубоко, проведены исследования вопросов образования и фиксации полученной формы. Разработаны макетно-модельный [15-18] и аналитический [1-3,19] методы проектирования объемной формы подушек прессов для формообразования и формования деталей одежды в соответствии с геометрией тканевых оболочек в чебышевской сети. Изучены условия формообразования фиксированной линии сгиба плоских оболочек с помощью шаблонов [20,21]. Однако, в отмеченных работах как цель рассматривается геометрическая сторона одеваемых поверхностей сетью, а средства достижения этой цели, т.е. вопросы механизма формообразования сети оболочек, от которых зависит качество формования деталей, в том числе их формоустойчивость, не затрагиваются.

Не нашли отражения в ранее выполненных исследованиях и особенности механизма формообразования на участке перехода от плоской формы к объемной. В частности, не ясно, как обеспечивается необходимое распределение и направление деформирования ткани при проведении формообразования линии отлета и переднего сгиба, соответственно цельновыкроенных деталей воротника и рукава и чем гарантируется отсутствие заминов и складок при формовании, а также растяжение нитей ткани.

С целью улучшения качества одежды за счет повышения её формоустойчивости в настоящей части работы исследованы процессы образования формы оболочек деталей посредством изменения сетевых углов, а также механизм формообразования оболочек цельновыкроенных деталей одежды под воздействием рабочих органов оборудования. На основе

проведенных исследований разработаны способы и оборудование для формообразования и влажно-тепловой обработки цельновыкроенных деталей мужской верхней одежды [9-14].

### ***1.1. Основные принципы формообразования двухслойных оболочек деталей одежды***

При рассмотрении ряда деталей одежды в качестве плоских оболочек допущены некоторые условности, приближения и т.д. Это дает лишь определенные удобства при проектировании деталей в чебышевской сети, хотя не отражает реальное состояние оболочек, сформованных на заданной объемной поверхности.

Проведенные исследования [22,23,38,39] показали, что ранее считавшиеся плоскими двухслойными оболочками детали одежды целесообразно рассматривать как двухслойные оболочки (ДО) тканой структуры с пространственной кривой линии сгиба (ПКЛС). В отличие от общепринятых плоских ДО, ДО ПКЛС могут быть образованы поверхностями, которые формируют детали на объемной поверхности при одевании готового изделия на фигуре человека или на манекене. Такие оболочки наиболее точно отражают характер формообразования деталей и соотношение деформирования сетевых углов в слоях оболочки. Это свидетельствует о целесообразности их изучения с целью изыскания возможностей изготовления цельновыкроенных деталей одежды сложных форм непосредственно на заданной объемной поверхности, что повысит их качество и формоустойчивость.

В настоящей работе выделяются два вида ДО ПКЛС. Первый вид оболочки - это когда слои расположены на одной поверхности одинаковой кривизны. Второй характеризуется расположением слоев на поверхностях разной кривизны.

ДО ПКЛС образуются, как и плоские, тремя способами (рис.1.1). Рассмотрим первый вид тканевых оболочек, в которых имеется ПКЛС и слои расположены на поверхности одинаковой кривизны. При этом, угол  $\gamma$  между слоями оболочки равен нулю. Для обозначения сетевых углов оболочки были

использованы общепринятые для плоских оболочек символы  $\alpha$  и  $\beta$  [15].

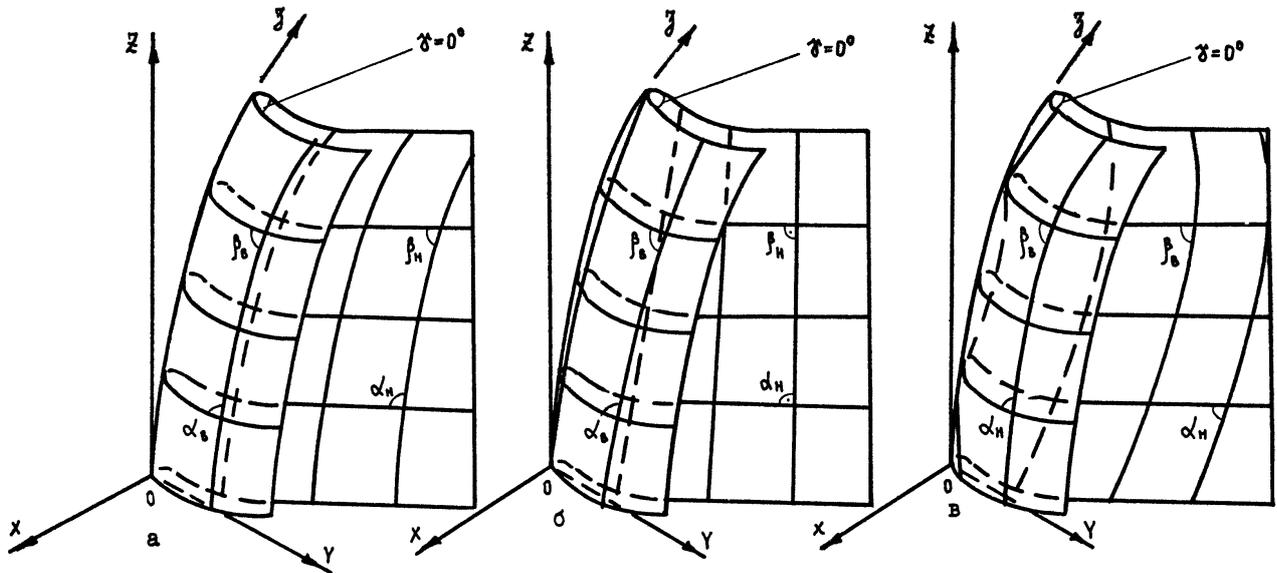


Рис.1.1. Двухслойные тканевые оболочки с пространственной криволинейной линией сгиба и расположением слоев на одной поверхности:  
 а – оболочка с ПКЛС, полученная первым способом;  
 б – оболочка с ПКЛС, полученная вторым способом;  
 в – оболочка с ПКЛС, полученная третьим способом.

Если ПКЛС образуется первым способом, при условии, что одна из нитей основы или утка совпадает с ПКЛС (рис.1.1.а), то сетевые углы  $\alpha$  и  $\beta$  деформируются в обоих слоях одинаково ( $\alpha_в = \alpha_н, \beta_в = \beta_н$ ).

При образовании ПКЛС вторым способом, когда линия сгиба не совпадает с нитью основы или утка (рис.1.1.б), деформирование сетевых углов происходит только на одном из слоев тканевой оболочки ( $\alpha_в \neq \alpha_н = 90^0, \beta_в \neq \beta_н = 90^0$ ).

Третий способ образования ПКЛС возникает в результате различного деформирования сетевых углов в верхнем и нижнем слоях ( $\alpha_в \neq \alpha_н, \beta_в \neq \beta_н$ ) без совмещения линии ПКЛС с нитью ткани (рис.1.1.в).

Аналогичным образом рассмотрен второй вид двухслойной оболочки с ПКЛС, в которой слои расположены на поверхностях различной кривизны (рис.1.2). При этом предполагается, что угол  $\gamma$  между слоями оболочки может иметь различные значения (в рассматриваемой схеме  $\gamma \neq 0^0$ ).

Двухслойная тканевая оболочка, образованная первым способом ПКЛС и с расположением слоев на поверхности различной кривизны, характеризуется линией сгиба, совпадающей с нитью основы или утка. Условия  $\alpha_в = \alpha_н, \beta_в = \beta_н$

выполнимы в случае, когда две поверхности имеют одинаковую кривизну (рис.1.2.а). В остальных случаях деформирование сетевых углов будут различным ( $\alpha_v \neq \alpha_n, \beta_v \neq \beta_n$ ).

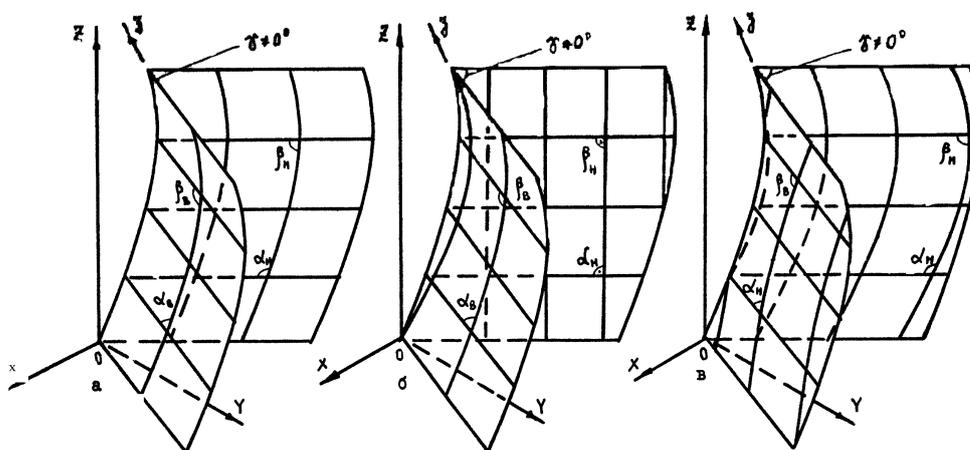


Рис.1.2. Двухслойные тканевые оболочки с пространственной криволинейной линией сгиба и расположением слоев на разных поверхностях:  
 а – оболочка с ПКЛС, образованная первым способом;  
 б – оболочка с ПКЛС, образованная вторым способом;  
 в – оболочка с ПКЛС, образованная третьим способом.

Второй способ образования ПКЛС оболочки с расположением слоев на поверхности различной кривизны определяется соотношениями  $\alpha_v \neq \alpha_n = 90^\circ, \beta_v \neq \beta_n = 90^\circ$  (рис.1.2.б). При этом, слои оболочки расположены на поверхности большей кривизны, деформирование сетевых углов в этом слое будет максимальным.

При третьем способе образования, линии сгиба не совпадают с нитями основы или утка, а деформирование сетевых углов в слоях оболочки будут различны:  $\alpha_v \neq \alpha_n, \beta_v \neq \beta_n$  (рис.1.2.в).

Существует также сложная двухслойная оболочка, которая содержит в себе элементы оболочек первого и второго видов, описанных выше, и имеет одну общую ПКЛС (рис.1.3).

Примером сложных оболочек могут быть детали рукава и брюк, в которых нижняя часть относится к плоским ДО, слои которых расположены в одной плоскости, а верхняя часть - к объемным оболочкам, с расположением слоев на разных поверхностях. При этом, они имеют одну общую линию сгиба.

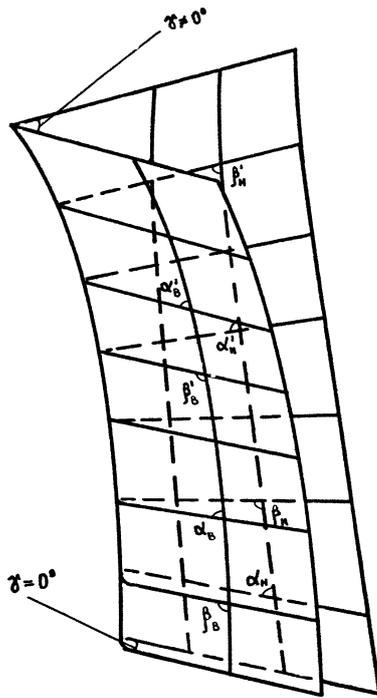


Рис.1.3.Схема сложной оболочки, состоящая из элементов плоской и объемной оболочек

В этой части исследований изложены результаты практического применения двухслойных тканевых оболочек деталей одежды на примере проектирования цельновыкроенных деталей воротника и рукава.

На рис.1.4 показан общий вид цельновыкроенного воротника в готовом виде, лежащего на объемной поверхности, форма которой имеет форму поверхности верхней части манекена. Как видно из рис.1.4, линия сгиба отлета 1 цельновыкроенного

воротника и линия сгиба стойки верхней 2 и нижней 3 частей воротника имеют пространственную форму, и слои расположены на разных поверхностях.

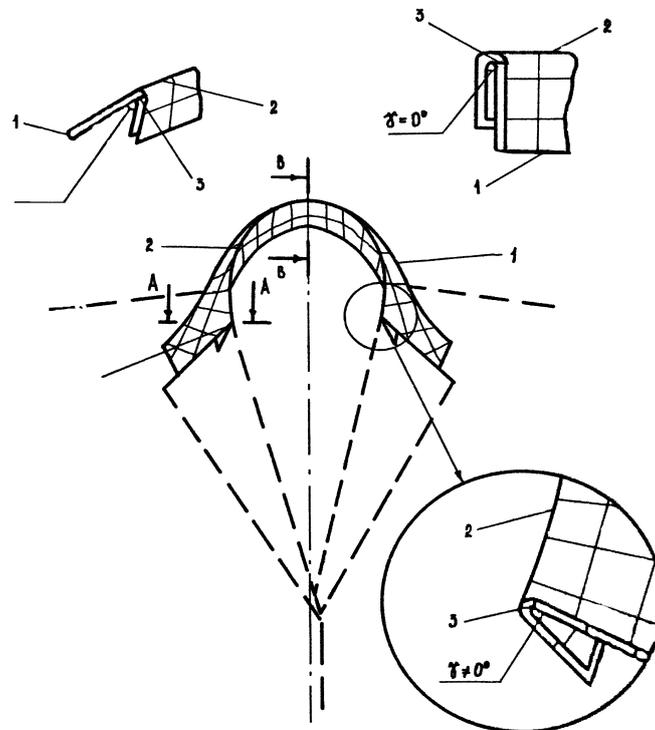


Рис.1.4.Общий вид цельновыкроенного воротника на поверхности манекена

На рис.1.5 рассмотрен характер формообразования двухслойной оболочки с тремя ПКЛС, которые существуют у цельновыкроенного воротника. Первая ПКЛС (рис.1.5 а), соответствующая линии сгиба отлета, обозначим ее ПКЛС-1, может быть образована первым, вторым или третьим способами в зависимости от рисунка ткани. При использовании гладкокрашенной ткани линия отлета может быть образована всеми тремя способами, а если ткань в клетку, или в полоску, то образование линии отлета детали целесообразно осуществлять вторым способом. Вторая и третья ПКЛС, соответствующая линиям сгиба стойки, обозначим их ПКЛС-2 и ПКЛС-3, требуют отдельного рассмотрения верхнего (участок стойки верхней части воротника) и нижнего (участок стойки нижней части воротника) слоев двухслойной оболочки, т.к. они зависят от способа образования линии сгиба отлета воротника.

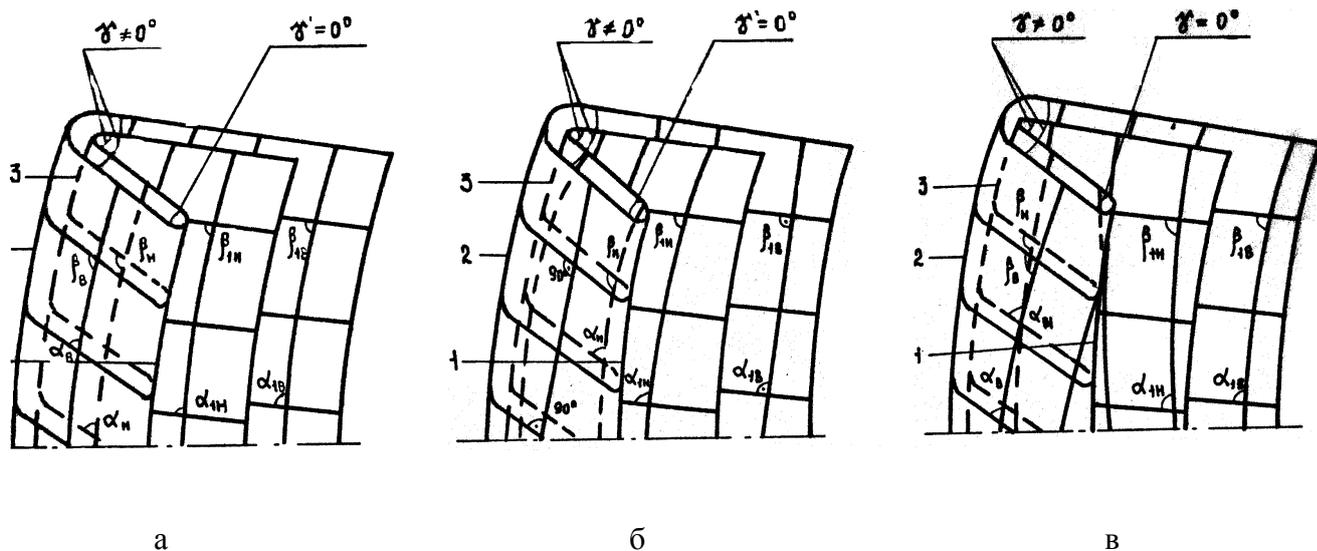


Рис.1.5. Двухслойная тканевая оболочка с тремя пространственными кривыми линиями сгибов

Если ПКЛС-1 образуется первым способом, то ПКЛС-2 и ПКЛС-3 образуются третьим способом. При этом, сетевые углы в слоях отлета и стойки воротника равны между собой ( $\alpha_e = \alpha_n, \beta_e = \beta_n, \alpha_{1e} \neq \alpha_{1n}, \beta_{1e} \neq \beta_{1n}, \alpha_e \neq \alpha_{1e}, \beta_e \neq \beta_{1e}$ ) (рис.1.5 а).

При образовании ПКЛС-1 цельновыкроенного воротника вторым способом, ПКЛС-2 образуется вторым способом, а ПКЛС-3 - третьим способом ( $\alpha_e \neq \alpha_n = 90^0, \beta_e \neq \beta_n = 90^0, \alpha_{1e} \neq \alpha_{1n}, \beta_{1e} \neq \beta_{1n}$ ) (рис.1.5 б).

Если ПКЛС-1 образован третьим способом, то ПКЛС-2 и ПКЛС-3 образуются третьим способом, при этом сетевые углы не равны между собой ( $\alpha_в \neq \alpha_{1в}, \beta_в \neq \beta_{1в}, \alpha_{1в} \neq \alpha_{1н}, \beta_{1в} \neq \beta_{1н}$ ) (рис.1.5 в).

В качестве объекта исследования формообразования воротника на объемной поверхности была выбрана модель пиджака. Для этого из сетки-канвы был предварительно изготовлен макет цельновыкроенного воротника и уложен на поверхности манекена типовой фигуры. В результате такого формообразования цельновыкроенного воротника на сложной поверхности была определена величина деформирования сетевых углов слоев оболочки и их соотношение. Установлено, что при угле  $\gamma = 20^\circ$  между слоями отлета и стойки, сетевой угол на участке концов стойки равняется  $85^\circ$  против  $81^\circ$  в работе [20] и  $70^\circ$  – [21]. При использовании предлагаемого способа формообразования сложных форм цельновыкроенного воротника перекося угла на указанном участке оболочки уменьшится на  $4^\circ$  и  $15^\circ$  по сравнению с ранее известными способами [4,37] (рис.1.6).

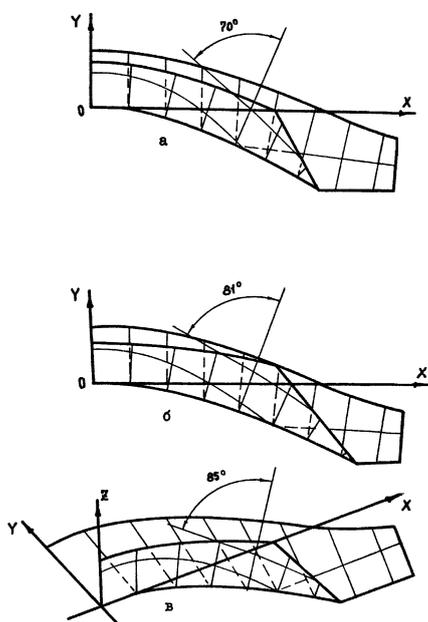


Рис.1.6.Деформирование сетевых углов развертки верхней части цельновыкроенного воротника при использовании известных способов формообразования (а, б) и предлагаемого (в)

Таким образом, рассмотрен характер формообразования и состояния деформирования структуры ткани при формировании пространственных двухслойных оболочек цельновыкроенных деталей одежды. Установлены соотношения деформирования сетевых углов слоев оболочки. На основе проведенных исследований появляется возможность более точно определять и обоснованно оценивать деформирование структуры двухслойных тканевых оболочек, а

также использовать полученные результаты при разработке усовершенствованного способа формообразования сложных плоско-объемных оболочек цельновыкроенных деталей на объемной поверхности [9,10,12-14].

### ***1.2. Исследование механизма формообразования оболочек цельновыкроенных деталей одежды***

Несколько вариантов поверхностей подушек может соответствовать заданной оболочке. Возможны несколько вариантов пространственной формы оболочек, которые могут быть получены перегибанием плоских двухслойных оболочек вдоль сгиба по двум прямым линиям.

***Механизм формообразования оболочек под воздействием плоских рабочих элементов оборудования.*** В процессе формообразования ткань подвергается деформированию, что вызывает на отдельных участках ткани распрямление, изгибание, изменение сетевых углов, деформацию нитей. Формообразование определяется характером деформации обрабатываемого материала и связано с получением заданных пространственных криволинейных линий и форм.

Образование формы за счет перекоса сетевых углов между нитями ткани осуществляется действием формообразующего элемента рабочего органа оборудования, направленного под углом к нитям основы и утка (рис.1.7). При этом, независимо от заданной формы линии сгиба оболочки, применение оборудования необходимо осуществлять посредством действия формообразующего элемента при симметричных деталях, от средней линии к периферийным участкам детали. Соотношение приложенных усилий при этом может выглядеть следующим образом:

$$F_{-n} < \dots < F_{-1} < F_0 > F_1 > \dots > F_n$$

В первом случае, когда исходная линия сгиба является выпуклой (рис.1.7 б), воздействие формообразующего элемента оборудования от центра к периферийным участкам связано с тем, чтобы исключить возможность появления излишков ткани в середине оболочки детали, которые имели место в

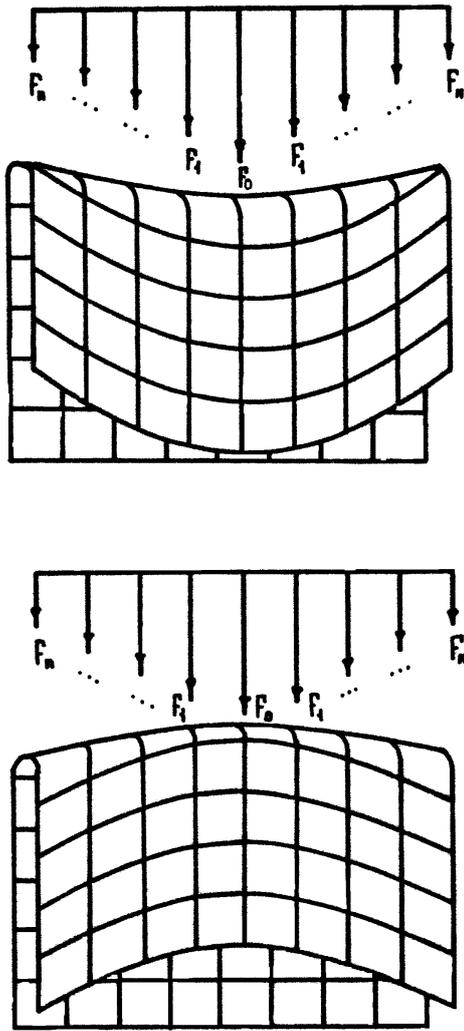


Рис.1.7.Схема направления деформирующих усилий при формообразовании под воздействием рабочих элементов для образования вогнутой и выпуклой линии сгиба

ранее проведенных исследованиях. А во втором случае, при образовании вогнутой линии, необходимость такого воздействия формообразующего элемента обусловлена потребностью одевания тканью поверхностей с кривой линией сгиба без растяжения нитей по линии сгиба (рис.1.7 а).

Указанные случаи с образованием выпуклых, вогнутых и комбинированных линий используются при формообразовании кривой линии сгибов отлета и стойки цельновыкроенного воротника цельновыкроенного рукава, а также при формообразовании линии сгиба лацкана и борта полочки [24,25].

### ***Механизм формообразования оболочек на рельефной поверхности.***

Исследование механизма формообразования оболочек производили с использованием технологических схем формования плоских оболочек на объемной (рельефной) поверхности, полученных преобразованием плоских двухслойных оболочек с криволинейной линией сгиба в однослойную [3,40]. Преобразование оболочки вдоль сгиба перегибанием ее по двум прямым линиям, касательным к линиям сгиба или параллельным им линиям, приводит к образованию складок вдоль линии сгиба. Преобразование оболочки в

поперечном к сгибу направлении сопровождается образованием конусообразных складок, идущих от сгиба к двум сторонам оболочки (рис.1.8.а,б) или к одной из них (рис.1.8 в,г,д). Возможно также комбинированное преобразование (рис.1.8 е).

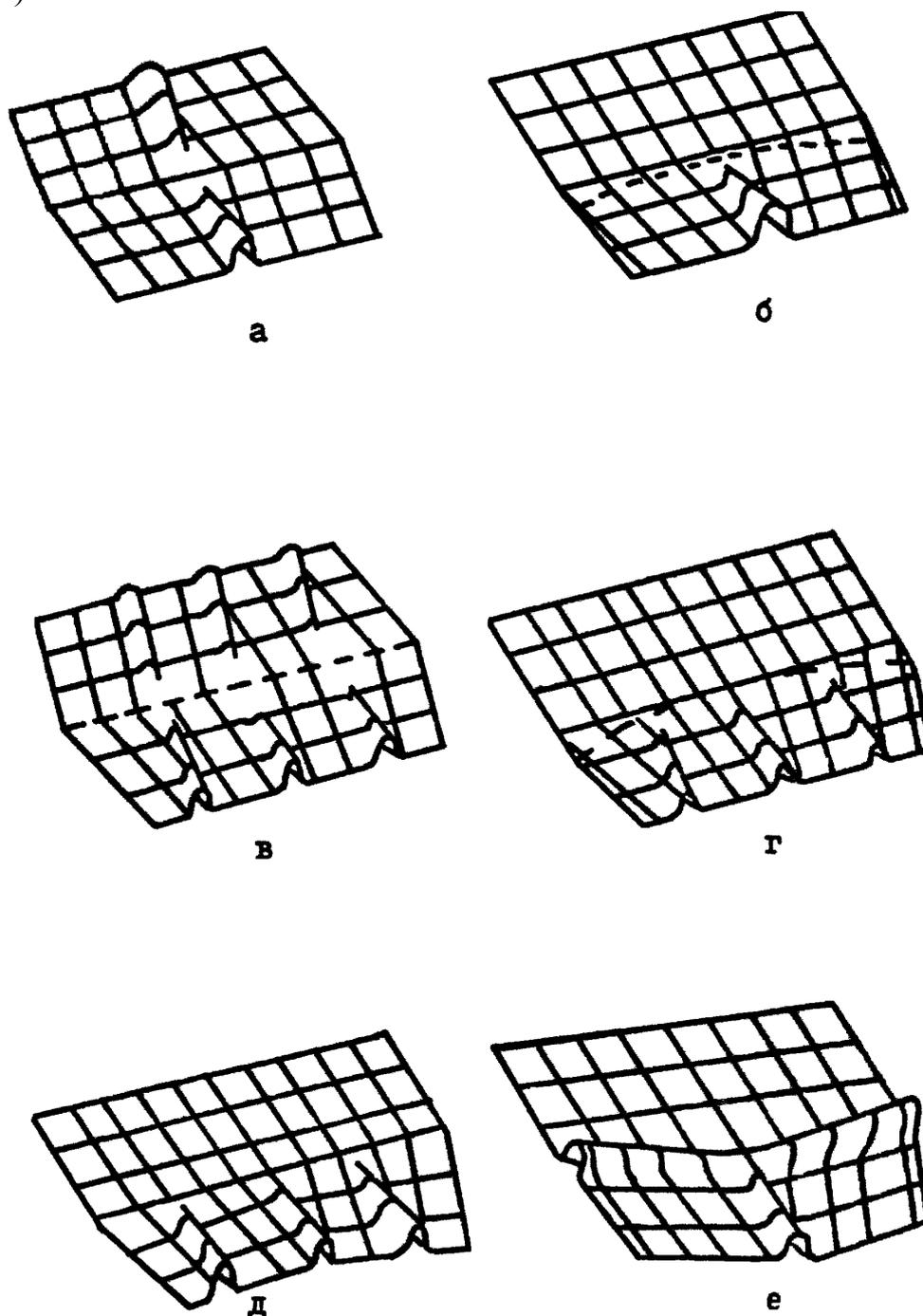


Рис.1.8.Варианты схем пространственной формы плоских оболочек, преобразованных в поперечном к сгибу направлении на плоскости

Преобразование плоских оболочек с вогнутой линией сгиба возможно образованием складок как в продольном и поперечном направлениях, так и под некоторым углом к линии сгиба (рис.1.8 а,б,в,г,д). Из этого следует, что для

формования оболочек из тканей, укладываемых в сложенном виде на плоскости с образованием вогнутой линии сгиба, необходимы формующие элементы, характер расположения которых должен содействовать образованию заданной формы.

Переход от полуфабриката, в котором нити ткани расположены строго перпендикулярно, к оболочкам с поперечными и наклонными складками за счет изменения сетевых углов, может быть осуществлен на подушках с соответствующим и указанным складкам рельефами подушек. Формообразующие элементы оборудования при этом должны иметь конфигурацию складок. Возможно два варианта устройства формообразующего элемента в подушках для осуществления такого формования. Первый вариант, когда рельефы поверхностей нижней и верхней подушек идентичны. В этом случае, рельефные формообразующие поверхности верхней и нижней подушек вылиты вместе с ее основанием. Второй вариант - формозадающая рельефная поверхность расположена на нижней или на верхней подушке, а подвижные формообразующие элементы воздействует на полуфабрикат соответственно сверху вниз или наоборот. Необходимость введения подвижного формообразующего элемента во втором варианте обусловлена стремлением предотвращения растяжения нитей ткани и появления складок при деформировании полуфабриката. В данном случае предусматривается вначале закрытие подушек без зажима ими деталей, т.е. с зазором, подготовка их к формообразованию, деформирование деталей подвижным элементом рабочих органов оборудования, а затем - фиксация формы прессованием [10,12-14,25-28].

Таким образом, были рассмотрены механизмы формообразования линий сгибов плоских и объемных оболочек деталей одежды, и доказано, насколько важно глубоко изучить вопросы механизмов деформирования слоев оболочек для получения качественной формы и проведения технологических процессов влажно-тепловой обработки цельновыкроенных деталей [41]. В связи с важностью этого вопроса, следующий раздел посвящен разработке

теоретических основ деформирования тканой структуры текстильных материалов в процессе формообразования оболочек деталей одежды.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТКАНИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ОБОЛОЧЕК ДЕТАЛЕЙ ОДЕЖДЫ**

Принцип способа формообразования и формования на основе применения ресурсосберегающей технологии с использованием цельновыкроенных деталей заключается в получении заданных объемных форм и плоских линий сгибов деталей и узлов швейных изделий исключительно за счет деформирования углов между нитями основы и утка основной ткани [1-4]. При этом, для достижения этих целей ткань полуфабриката переходит в напряженно-деформированное состояние с помощью плоских шаблонов, подушек прессового оборудования с рельефной поверхностью, подвижных пуансонов, а также их комбинации.

### **2.1. Элементы теории деформирования образца ткани вдоль нитей основы и уточных нитей**

Суть способа формообразования и формования на основе применения ресурсосберегающей технологии с использованием цельновыкроенных деталей заключается в получении заданных плоско-объемных форм и линий сгибов деталей швейных изделий исключительно за счет деформирования углов между нитями основы и уточными нитями ткани. При этом, для достижения этих целей ткань полуфабриката переводится в оболочку путем перевода её нитей в напряженно-деформированное состояние с помощью специальных подвижных рабочих органов: плоских шаблонов, подушек прессового оборудования с рельефной поверхностью, подвижных матриц, а также их комбинации.

Рассмотрим напряженное состояние образца заданной ткани, подвергающейся деформированию растяжением вдоль нитей [34] (рис.2.1).

Пусть при  $t \geq 0$ , правому концу образца, например, вдоль нити основы приложена равномерно распределенная в плоскости  $(x, z)$  и постоянная по времени растягивающая сила  $P$ . Тогда, при  $0 \leq t < \infty$  на каждый элемент образца

вершиной  $dz$ , или в частности каждой нити основы будут действовать продольные силы (рис.2.2).

$$dP_{i,j} = p_{i,j}^{(0)} dz, \quad (2.1)$$

где  $p_{i,j}^{(0)}$  – сила, приходящаяся на единицу длины координаты  $z$ ;  $i=1,2,3,\dots,k$ ;  $j=1,2,3,\dots,n$ ;  $k$  и  $n$  – количество уточных нитей и нитей основы в данном образце соответственно.

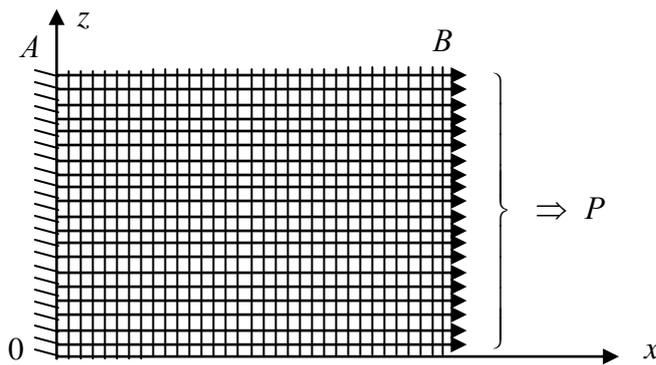


Рис. 2.1. Схема равномерного нагружения образца ткани

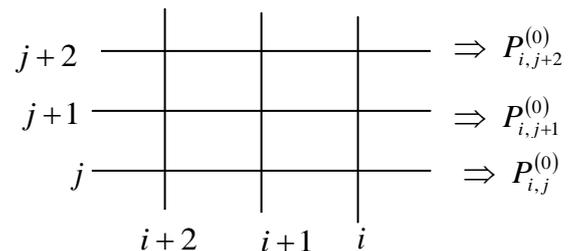


Рис. 2.2. Схема расчета образца, нагруженного вдоль нитей основы

Очевидно, что элементарная сила  $dP$  по величине равна сумме сил  $p_{i,j}^{(0)}dz$ .

Отсюда

$$P = \int_0^z p_{i,j}^{(0)} d\xi. \quad (2.2)$$

Согласно теории малых деформаций механики, при возрастании силы  $P$  от нуля до разрывной, каждый элемент основы, сначала будет растягиваться по закону Гука. При этом, нормальное напряжение, возникающее в поперечном сечении  $i$  – того элемента  $j$  – ой нити основы (натяжение, приходящееся на единицу площади поперечного сечения нити основы) определяется по формуле

$$\sigma_{i,j}^{(0)} = \frac{P_{i,j}^{(0)}}{F_{i,j}^{(0)}},$$

где  $F_{i,j}^{(0)}$  – площадь поперечного сечения нити основы.

Абсолютные  $\Delta l_{i,j}^{(0)}$  и относительные  $\varepsilon_{i,j}^{(0)}$  деформации  $i$  – того элемента  $j$  – ой основы соответственно равны (рис.2.2):

$$\Delta l_{i,j}^{(0)} = l'_{i,j}{}^{(0)} - l_{i,j}^{(0)} = \frac{P_{i,j}^{(0)} l_{i,j}^{(0)}}{E_{i,j}^{(0)} F_{i,j}^{(0)}}, \quad \varepsilon_{i,j}^{(0)} = \frac{\sigma_{i,j}^{(0)}}{E_{i,j}^{(0)}}, \quad (2.3)$$

где  $l_{i,j}^{(0)}$  и  $l'_{i,j}{}^{(0)}$  – длины недеформированного и деформированного  $i$  – того элемента  $j$  – ой нити основы;  $l_j^{(0)} = \sum_{i=1}^k l_{i,j}^{(0)}$  и  $l'_j{}^{(0)} = \sum_{i=1}^k l'_{i,j}{}^{(0)}$  – общие длины  $j$  – ой нити основы до и после деформации соответственно;  $E_{i,j}^{(0)}$  – модуль упругости материала нити основы.

Общие значения абсолютной  $\Delta l_j^{(0)}$  и относительной  $\varepsilon_j^{(0)}$  деформации  $j$  – ой основы равны соответственно:

$$\Delta l_j^{(0)} = \sum_{i=1}^k \frac{P_{i,j}^{(0)} l_{i,j}^{(0)}}{E_{i,j}^{(0)} F_{i,j}^{(0)}}; \quad \varepsilon_j^{(0)} = \frac{1}{E_{i,j}^{(0)}} \sum_{i=1}^k \sigma_{i,j}^{(0)}. \quad (2.4)$$

Перемещение левого конца – сечения  $A$  (рис.2.1) равно нулю, а полное перемещение  $\delta_B^{(0)}$  правого конца – сечения  $B$  определяется по формуле

$$\delta_B^{(0)} = \Delta l_j^{(0)} = \sum_{i=1}^k \frac{P_{i,j}^{(0)} l_{i,j}^{(0)}}{E_{i,j}^{(0)} F_{i,j}^{(0)}}. \quad (2.5)$$

Горизонтальные стороны прямоугольников, образованных первоначально нитями основы и уточными нитями, после растяжения окажутся несколько растянутыми в направлении оси  $x$ , а вершины – недеформированными. Уточные нити будут перемещаться вместе с нитями основы в направлении роста оси  $x$ . Перемещение  $i$  – ой уточной нити, расположенной на расстоянии  $x$  от начала координат, равно перемещению поперечных сечений нитей основы с координатой  $x$ , т.е.

$$\delta_{i,x}^{(y)} = \delta_{j,x}^{(0)} = \frac{N_{i,x}^{(0)} x}{E_{i,j}^{(0)} F_{i,j}^{(0)}}, \quad (2.6)$$

где  $N_{i,x}^{(0)}$  – продольное усилие, возникающее в сечении  $x$  нити основы.

В наиболее общих случаях  $N_{i,x}^{(0)} = \int_0^x p_{i,j} d\zeta$ , в частности, если все нити основы однородны, то  $dN_{i,x}^{(0)} = p_{i,j} dx$  [36].

Согласно условиям Коши [35], нити основы при растяжении давления друг на друга не оказывают, и поэтому, в направлении оси  $z$  нормальные напряжения отсутствуют, т.е.  $\sigma_{xz} = 0$ .

Таким образом, в рассмотренном случае нагружения, силу растяжения испытывают только нити основы, а уточные нити остаются недеформированными. В обеспечении прочности рассматриваемого образца на растяжение участвуют только нити основы. Условие прочности рассматриваемого образца в этом случае будет

$$(T_{i,j}^{(0)})_{max} \leq [T_0], \quad (2.7)$$

где  $(T_{i,j}^{(0)})_{max}$  – максимальное значение натяжения  $i$  – элемента  $j$  – ой нити основы;  $[T_0]$  – допустимое значение натяжения нити основы, т.е. на практике разрывная нагрузка, соответствующая данной нити основы.

В зависимости от первоначальной плотности ткани, и интенсивности силы растяжения, силы трения, возникающие между нитями основы и в точках пересечения нитей основы и уточных нитей, меняются. При увеличении деформации, поперечные сечения нити основы уменьшаются, и это приводит к убыванию контактной силы между нитями основы и нитей основы с уточными нитями.

Пусть теперь рассматриваемый образец ткани нагружен вдоль уточных нитей, как показано на рис.2.3. Для удобства анализа и сравнения, в дальнейшем предыдущий способ приложения нагрузки – вдоль нити основы, назовем первым способом, а рассматриваемый здесь способ – вторым.

При этом, если первоначальные условия нагружения первого способа оставить без изменения, то приведенные выше рассуждения и полученные формулы (1)–(7) преобразуются следующим образом. При  $0 \leq t < \infty$  на каждый элемент образца основанием  $dx$ , или в частности каждой уточной нити, будут действовать продольные (в данном случае вертикально направленные) силы

$$dP_{j,i} = p_{j,i}^{(y)} dx, \quad (2.8)$$

где  $p_{j,i}^{(y)}$  – сила, приходящаяся на единицу длины координаты  $x$  (рис.2.3).

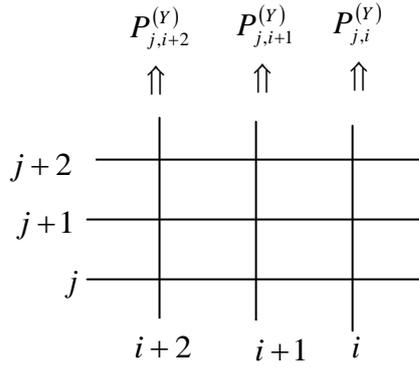


Рис.2.3. Схема расчета образца, нагруженного вдоль уточных нитей

Общая сила  $P$  и нормальное напряжение  $\sigma_{j,i}^{(y)}$ , возникающее в поперечном сечении  $j$  – того элемента  $i$  – ой уточной нити, определяются по формулам соответственно

$$P = \int_0^z p_{j,i}^{(y)} d \xi, \quad \sigma_{j,i}^{(y)} = \frac{P_{j,i}^{(y)}}{F_{j,i}^{(y)}}, \quad (2.9)$$

где  $F_{j,i}^{(y)}$  – площадь поперечного сечения уточной нити.

Абсолютные  $\Delta l_{j,i}^{(y)}$  и относительные  $\varepsilon_{j,i}^{(y)}$  деформации  $j$  – того элемента  $i$  – ой уточной нити равны соответственно:

$$\Delta l_{j,i}^{(y)} = l'_{j,i}^{(y)} - l_{j,i}^{(y)} = \frac{P_{j,i}^{(y)} l_{j,i}^{(y)}}{E_{j,i}^{(y)} F_{j,i}^{(y)}}, \quad \varepsilon_{j,i}^{(y)} = \frac{\sigma_{j,i}^{(y)}}{E_{j,i}^{(y)}}, \quad (2.10)$$

где  $l_{j,i}^{(y)}$  и  $l'_{j,i}^{(y)}$  – длины недеформированного и деформированного  $j$  – того элемента  $i$  – ой уточной нити;  $l_i^{(y)} = \sum_{j=1}^n l_{j,i}^{(y)}$  и  $l'_i{}^{(y)} = \sum_{j=1}^n l'_{j,i}{}^{(y)}$  – общие длины  $i$  – ой уточной нити до и после деформации соответственно;  $E_{j,i}^{(y)}$  – модуль упругости материала уточной нити.

Согласно закону Гука, общие значения абсолютной  $\Delta l_i^{(y)}$  и относительной  $\varepsilon_i^{(y)}$  деформации  $i$  – ой уточной нити равны соответственно:

$$\Delta l_i^{(y)} = \sum_{j=1}^n \frac{P_{j,i}^{(y)} l_{j,i}^{(y)}}{E_{j,i}^{(y)} F_{j,i}^{(y)}}; \quad \varepsilon_i^{(y)} = \frac{1}{E_{j,i}^{(y)}} \sum_{j=1}^n \sigma_{j,i}^{(y)}. \quad (2.11)$$

Перемещение нижнего конца образца равно нулю, а полное перемещение  $\delta^{(Y)}$  верхнего конца определяется по формуле

$$\delta^{(Y)} = \Delta l_i^{(Y)} = \sum_{j=1}^n \frac{P_{j,i}^{(Y)} l_{j,i}^{(Y)}}{E_{j,i}^{(Y)} F_{j,i}^{(Y)}}. \quad (2.12)$$

Перемещение  $j$  – ой нити основы, расположенной на расстоянии  $z$  от начала координат, равно перемещению поперечных сечений уточных нитей с координатой  $z$

$$\delta_{j,z}^{(0)} = \delta_{i,z}^{(Y)} = \frac{N_{j,z}^{(Y)} z}{E_{j,z}^{(Y)} F_{j,z}^{(Y)}}, \quad (2.13)$$

где  $N_{j,z}^{(Y)}$  – продольное усилие, возникающее в сечении  $x$  уточной нити,

$$N_{j,z}^{(Y)} = \int_0^z p_{j,i} d\zeta \quad \text{или} \quad dN_{j,z}^{(Y)} = p_{j,i} dz.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае, вертикальные стороны прямоугольников, образованных первоначально нитями основы и уточными нитями, после растяжения окажутся несколько растянутыми в направлении оси  $z$ , а основания остаются недеформированными. Нити основы будут перемещаться вместе с уточными нитями в направлении роста оси  $z$ . Перемещение  $i$  – ой нити основы, расположенной на расстоянии  $z$  от начала координат, равно перемещению поперечных сечений уточных нитей с координатой  $z$ .

В данном случае, силу растяжения испытывают только уточные нити, а нити основы остаются недеформированными. Условие прочности материала в данном случае будет

$$(T_{j,i}^Y)_{\max} \leq [T_Y], \quad (2.14)$$

где  $(T_{j,i}^{(0)})_{\max}$  – максимальное значение натяжения  $j$  – элемента  $i$  – ой нити основы;  $[T_Y]$  – допустимое значение натяжения уточной нити, т.е. разрывная нагрузка, соответствующая для уточных нитей данного образца.

Если нити основы и уточные нити обладают адекватными физико-механическими свойствами, т.е. если для данных нитей  $[T_0] = [T_Y] = [T]$ , то условия (2.7) и (2.14) совпадают

$$(T_{i,j})_{max} \leq [T]. \quad (2.15)$$

При увеличении относительной деформации, поперечные сечения уточных нитей уменьшаются, и это приводит к убыванию контактной силы между уточными нитями и уточных нитей с нитями основы.

На практике испытания образца проводится с помощью разрывной машины. Продольное усилие от нуля доводится до разрывной силы, и в каждом случае определяются соответствующие для данного случая (образца) разрывные нагрузки. При этом, наиболее важным для определения прочности ткани является разрывная нагрузка и поведение образца и ее элементов (собственно нитей основы и уточных нитей) при разрывной нагрузке.

Когда напряжения и деформации достигают предела пропорциональности материала, нити основы (в первом случае) и уточные нити (во втором случае) будут деформироваться по законам текучести и местного сопротивления [35,36].

Из рассмотренных двух случаев нагружения образца ткани следует, что в первом случае силу растяжения испытывают только нити основы, а во втором случае – только уточные нити. Поэтому, на практике, когда ткань часто подвергается растяжению, оба случая нагружения не являются рациональными. В обоих вариантах нагружения только одни нити испытывают максимальные напряжения, а другие – оказываются не напряженными.

На рис.2.4 приведены зависимости абсолютного удлинения  $\Delta l_{i,j}$  от жесткости  $EF$  материала нити, полученные при  $l_{i,j} = 0.1 \text{ см}$  и:  $P_{i,j} = 10 \text{ сН}$  – кривая 1;  $P_{i,j} = 20 \text{ сН}$  – кривая 2;  $P_{i,j} = 30 \text{ сН}$  – кривая 3;  $P_{i,j} = 40 \text{ сН}$  – кривая 4. Видно, что с увеличением силы растяжения, абсолютные удлинения элементарных нитей увеличиваются. Увеличение длины элементарных нитей или уменьшение жесткости материала нити также приводят к увеличению абсолютного удлинения.

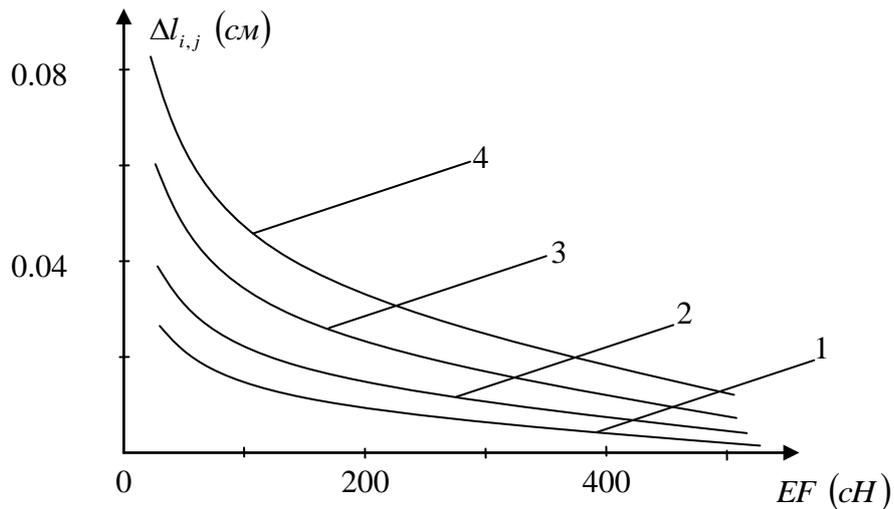


Рис.2.4. Зависимости абсолютного удлинения  $\Delta l_{i,j}$  от жесткости  $EF$  материала нити

На рис. 2.1–2.4 приведены зависимости абсолютного удлинения элементарных нитей основы, уточной нити, перемещения свободных концов образца испытываемой ткани вдоль осей  $y$  и  $z$  от жесткости материала нити, полученные при  $l_{i,j} = 0,1$  см и  $P_{i,j} = 10$  сН,  $P_{i,j} = 20$  сН,  $P_{i,j} = 30$  сН,  $P_{i,j} = 40$  сН.

Предполагается, что образец ткани, состоящий из 50 нитей основы и 40 уточных нитей, подвергается двум случаям испытания: в первом случае считается, что левый конец образца жестко закреплен, а правому – свободному концу, вдоль 50 нитей основы (оси  $X$ ), прилагается внешняя (горизонтальная) растягивающая сила, равная по величине  $n \cdot p_{i,j}$ . Во втором случае – нижний конец образца закреплен, а верхнему – свободному концу – вдоль 40 уточных нитей прилагается внешняя растягивающая сила, равная по величине  $k \cdot p_{i,j}$ .

Общие силы, приложенные в вертикальном направлении – вдоль уточных нитей равны:

$$- P_j = k \cdot p_{i,j} = 40 \cdot p_{i,j} = 40 \cdot 10 = 400 \text{ сН (рис.2.5);}$$

$$- P_j = k \cdot p_{i,j} = 40 \cdot p_{i,j} = 40 \cdot 20 = 800 \text{ сН (рис.2.6);}$$

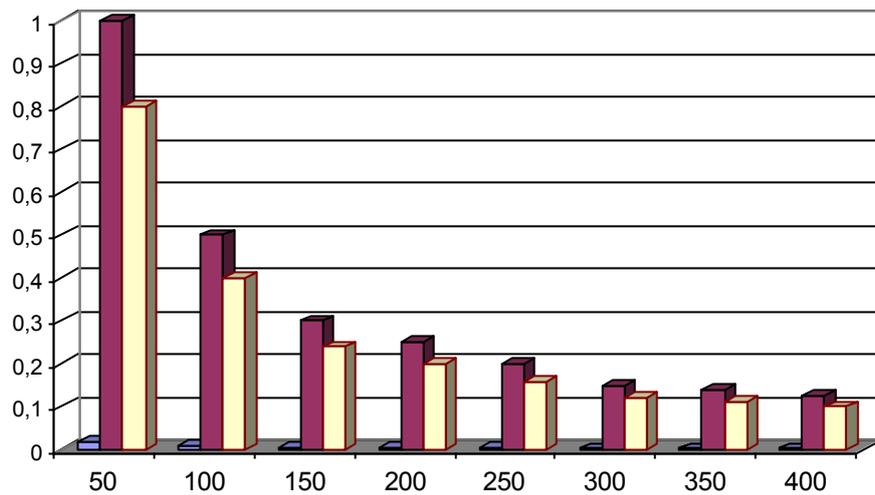


Рис.2.5. Зависимости абсолютного удлинения элементарных нитей основы, уточных нитей, перемещения свободных концов образца испытываемой ткани вдоль осей  $y$  и  $z$  от жесткости материала нити, полученные при  $P_{i,j}=10 \text{ cH}$  и  $l_{i,j}=0,1 \text{ см}$

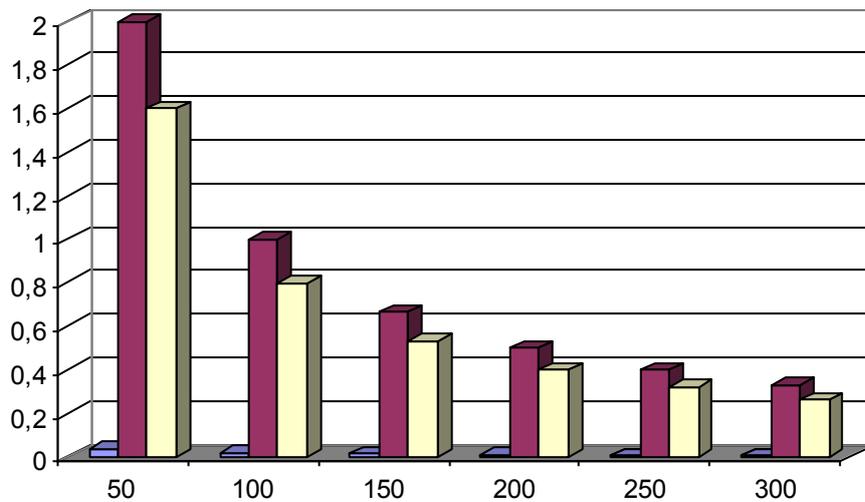


Рис.2.6. Зависимости абсолютного удлинения элементарных нитей основы, уточных нитей, перемещения свободных концов образца испытываемой ткани вдоль осей  $y$  и  $z$  от жесткости материала нити, полученные при  $P_{i,j}=20 \text{ cH}$  и  $l_{i,j}=0,1 \text{ см}$

–  $P_j = k \cdot p_{i,j} = 40 \cdot p_{i,j} = 40 \cdot 30 = 1200 \text{ cH}$  (рис.2.7);

–  $P_j = k \cdot p_{i,j} = 40 \cdot p_{i,j} = 40 \cdot 40 = 1600 \text{ cH}$  (рис.2.8),

в горизонтальном направлении – вдоль нитей основы:

$$- P_i = n \cdot p_{i,j} = 50 \cdot p_{i,j} = 50 \cdot 10 = 500 \text{ cH (рис.2.5);}$$

$$- P_i = n \cdot p_{i,j} = 50 \cdot p_{i,j} = 50 \cdot 20 = 1000 \text{ cH (рис.2.6);}$$

$$- P_i = n \cdot p_{i,j} = 50 \cdot p_{i,j} = 50 \cdot 30 = 1500 \text{ cH (рис.2.7);}$$

$$- P_i = n \cdot p_{i,j} = 50 \cdot p_{i,j} = 50 \cdot 40 = 2000 \text{ cH (рис.2.8).}$$

Общая длина образца в горизонтальном направлении равна  $50 \cdot l_{i,j} = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ см}$ , а в вертикальном направлении  $40 \cdot l_{i,j} = 40 \cdot 0,1 = 4 \text{ см}$ .

Из рассматриваемых таблиц видно, что увеличение жесткости  $EF$  материала нити приводит к уменьшению перемещения  $\delta_{j,B}^{(y)}$  и  $\delta_{i,B}^{(z)}$  свободных концов испытываемого образца ткани.

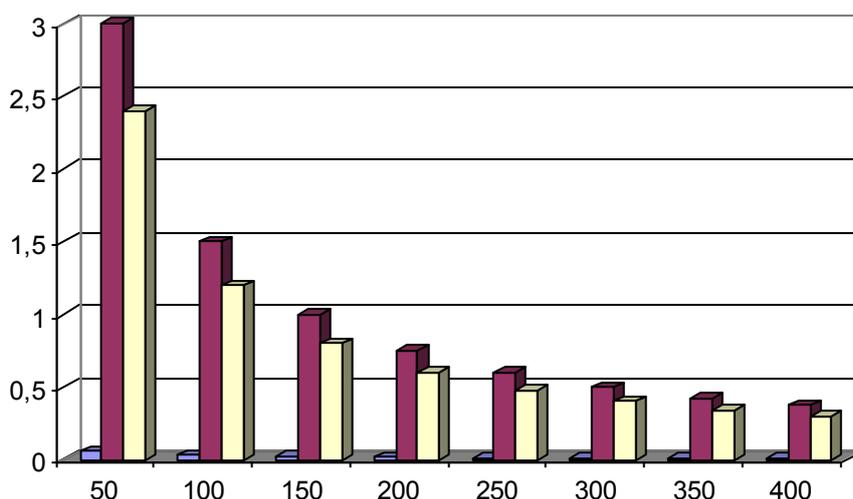


Рис.2.7. Зависимости абсолютного удлинения элементарных нитей основы, уточных нитей, перемещения свободных концов образца испытываемой ткани вдоль осей  $y$  и  $z$  от жесткости материала нити, полученные при  $P_{i,j}=30 \text{ cH}$  и  $l_{i,j}=0,1 \text{ см}$

Следует отметить, что здесь рассматривается растяжение идеальной нити без учета трения между нитями основы и уточных нитей. Учет силы трения приведет к изменению перемещения и деформации обеих нитей вдоль горизонтальных и вертикальных направлений. Свободные концы образца будут испытывать максимальные растяжения, а закрепленные концы – остаются неподвижными.

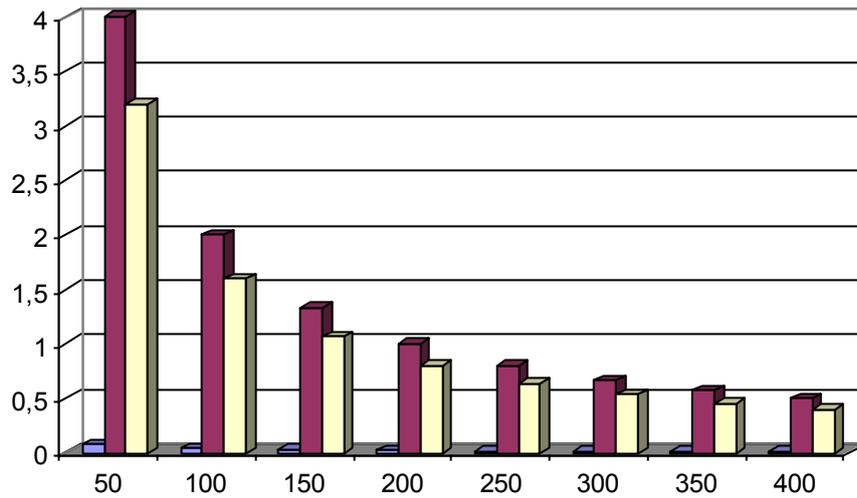


Рис. 2.8. Зависимости абсолютного удлинения элементарных нитей основы, уточных нитей, перемещения свободных концов образца испытываемой ткани вдоль осей  $y$  и  $z$  от жесткости материала нити, полученные при  $P_{i,j}=40 \text{ сН}$  и  $l_{i,j}=0,1 \text{ см}$

## 2.2. Теория деформирования образца ткани растяжением под углом наклона к нитям основы и уточным нитям

До сих пор рассматривались задачи определения натяжения, когда внешние силы действуют вдоль нитей основы и уточных нитей. Ниже предполагается, что внешние силы действуют под углом к направлениям нитей основы и уточных нитей. Основное внимание уделяется определению напряженного состояния, перемещения и деформации заданной или произвольной ячейки ткани, образованной пересечением двух нитей основы с двумя уточными нитями. Приведены аналитические решения и алгоритм проведения численно-экспериментальных исследований напряженного состояния образца ткани. Дан анализ и сравнение результатов проведенных численно-экспериментальных исследований.

## 2.2.1. Методика определения натяжения нити заданной ячейки образца ткани

Пусть растягивающая сила  $P$  прилагается вдоль направления диагоналей четырехугольников, образованных пересечением уточных нитей и нитей основы (рис.2.9).

При этом, если сила  $P$  по-прежнему равномерно распределена по оси  $z$ , то под действием составляющих  $p_{i,j}$  каждая из ячеек (четырёхугольников)  $a_1a_2a_3a_4$  переходят в (параллелограммы или ромбики)  $a'_1a'_2a'_3a'_4$  (рис.2.10). В этом случае силы  $p_{i,j}$ , в отличие от предыдущих случаев, одновременно действуют на уточные нити и нити основы.

Пусть на рис.2.10 стороны  $a'_1a'_2$  и  $a'_3a'_4$  параллелограмма будут нитями основы, а стороны  $a'_2a'_3$  и  $a'_4a'_1$  – уточными нитями. Такое напряженное состояние возникает, если, например, силу  $P$  на рис.2.1 повернуть в направлении против часовой стрелки на некоторый угол  $\beta$ , в частности на  $45^\circ$ .

В результате растяжения нити основы  $a_1a_2$  и уточной нити  $a_1a_4$  узловая точка  $a_1$  переходит в точку  $a'_1$ . Аналогично, в результате растяжения уточной нити  $a_2a_3$  и нити основы  $a_3a_4$  узловая точка  $a_3$  переходит в точку  $a'_3$ . В результате изменения длины и поворота на некоторые углы нитей основы и уточных нитей, точки  $a_2$  и  $a_4$  переходят в новые положения  $a'_2$  и  $a'_4$  соответственно. В частности, если силы  $p_{i,j}$  направлены вдоль большой диагонали элементарных четырехугольников, как это показано на рис.2.10, то точки  $a_1$  и  $a_3$  переходят на одинаковые расстояния  $dx$ , а точки  $a_2$  и  $a_4$  – на одинаковые расстояния  $dz$ .

В общем случае, согласно методу сечения, силы  $p_{i,j}$  по уточным нитям и нитям основы распределяются следующим образом (рис.2.11):

- вдоль нитей основы  $r_{a_1a_2}^{(0)} \neq r_{a_3a_4}^{(0)}$  ;
- вдоль уточных нитей  $r_{a_2a_3}^{(y)} \neq r_{a_1a_4}^{(y)}$ ,

где  $r_{a1a4}^{(0)}$ ,  $r_{a3a4}^{(0)}$ ,  $r_{a1a4}^{(Y)}$  и  $r_{a2a3}^{(Y)}$  – равнодействующие сил, действующих на нити основы и уточные нити соответственно (внутренние силы натяжения, возникающие в поперечных сечениях соответствующих нитей), т.е. силы  $p_{i,j}$  и  $p'_{i,j}$  являются равнодействующими сил  $r_{a1a2}^{(0)}$ ,  $r_{a1a4}^{(Y)}$ ,  $r_{a2a3}^{(Y)}$ ,  $r_{a3a4}^{(0)}$ .

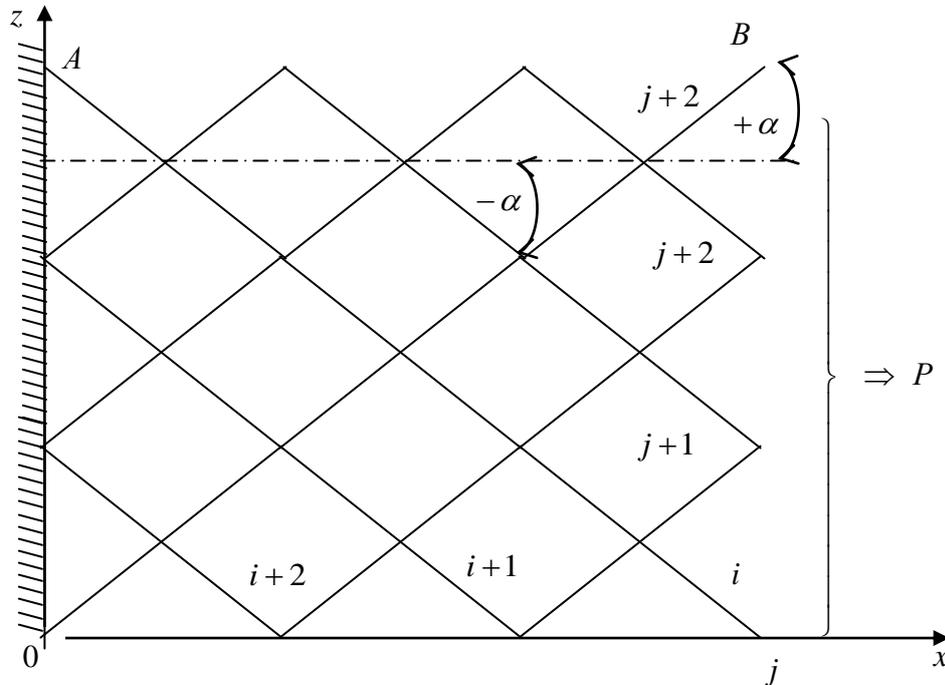


Рис.2.9. Схема приложения внешней силы по диагонали четырехугольников

В результате деформирования сторон ромбика углы  $\alpha_{1,2}$ ,  $\alpha_{2,3}$ ,  $\alpha_{3,4}$  и  $\alpha_{1,4}$ , образованные между нитями основы и уточными нитями и горизонтальной осью  $x$ , также деформируются и принимают новые значения  $\alpha'_{1,2} = \alpha_{1,2} \pm \theta_{1,2}$ ,  $\alpha'_{2,3} = \alpha_{2,3} \pm \theta_{2,3}$ ,  $\alpha'_{3,4} = \alpha_{3,4} \pm \theta_{3,4}$ ,  $\alpha'_{1,4} = \alpha_{1,4} \pm \theta_{1,4}$ . Знаки  $+$  или  $-$  выбираются в зависимости от направления деформирования соответствующих углов – если, в результате деформирования углы возрастают, то следует принимать положительные, и если углы убывают, то – отрицательные значения. Например, на рис.2.10 и 2.11 эти углы принимают следующие значения  $\alpha'_{1,2} = \alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$ ,  $\alpha'_{2,3} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$ ,  $\alpha'_{3,4} = \alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$ ,  $\alpha'_{1,4} = \alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$ .

Из рис.2.10 и 2.11 найдем

$$p_{i,j} = r_{a1a2}^{(0)} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) + r_{a1a4}^{(Y)} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}), \quad (2.16)$$

$$p'_{i,j} = r_{a_2a_3}^{(Y)} \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) + r_{a_3a_4}^{(0)} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) . \quad (2.17)$$

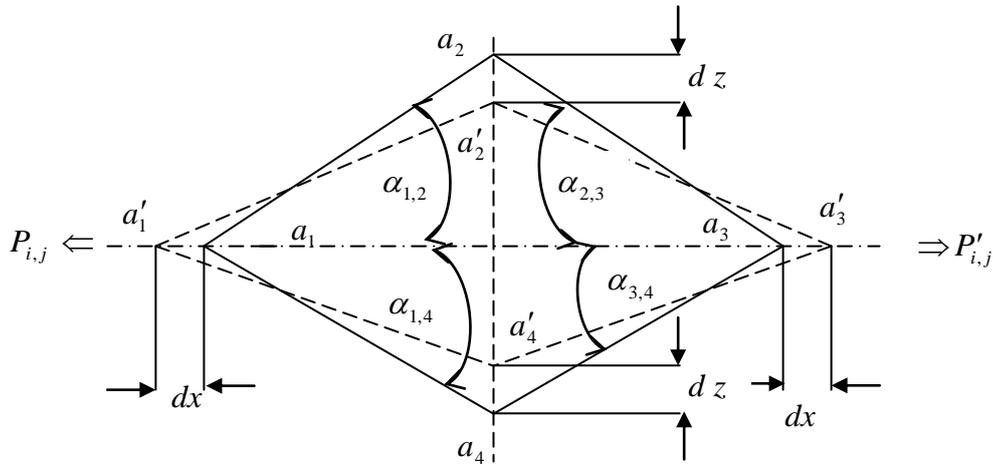


Рис.2.10. Схема деформации уточных нитей и нитей основы заданной ячейки

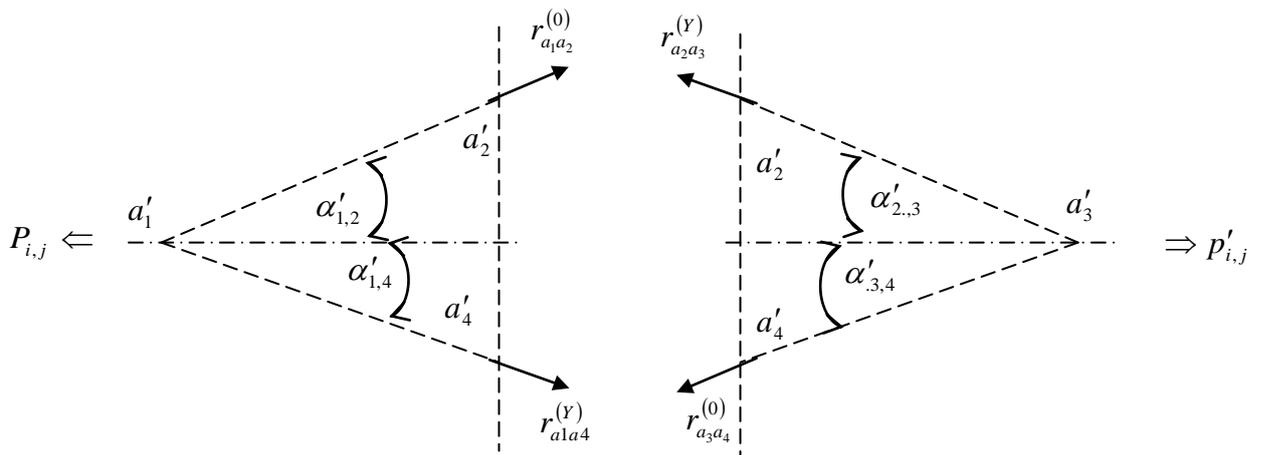


Рис. 2.11. Схема применения метода сечения к заданной ячейке образца

В общем случае, как было отмечено выше, натяжения  $r_{a_1a_2}^{(0)}$ ,  $r_{a_1a_4}^{(Y)}$ ,  $r_{a_2a_3}^{(Y)}$ ,  $r_{a_3a_4}^{(0)}$  имеют различные значения, так как в реальной ткани в узловых точках (в точках перекрытия) имеют место силы трения и давления между нитями основы и уточными нитями. Поэтому для определения четырех неизвестных натяжений  $r_{a_1a_2}^{(0)}$ ,  $r_{a_1a_4}^{(Y)}$ ,  $r_{a_2a_3}^{(Y)}$ ,  $r_{a_3a_4}^{(0)}$  потребуются еще два уравнения. В качестве двух недостающих уравнений можно принять условия равновесия, вытекающие из рис.2.12. На этом рисунке предполагается, что внешние силы  $p_{m,n}$ ,  $p'_{m,n}$  имеют меньшие значения, чем силы  $p_{i,j}$ ,  $p'_{i,j}$ . Поэтому, рассматриваемая ячейка в

процессе деформации в направлении оси  $x$  растягивается, а в направлении оси  $z$  – несколько сужается. Уравнения равновесия, написанные в проекциях на ось  $z$ , принимают вид

$$p'_{m,n} = r_{a_1 a_2}^{(0)} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) + r_{a_2 a_3}^{(y)} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}), \quad (2.18)$$

$$p_{m,n} = r_{a_1 a_4}^{(y)} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) + r_{a_3 a_4}^{(0)} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}). \quad (2.19)$$

Уравнения (2.16)–(2.19) приводим к виду

$$p'_{i,j} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) = r_{a_1 a_4}^{(y)} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - r_{a_2 a_3}^{(y)} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}), \quad (2.20)$$

$$p'_{i,j} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) = r_{a_2 a_3}^{(y)} \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - r_{a_1 a_4}^{(y)} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}), \quad (2.21)$$

$$p_{i,j} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) = r_{a_1 a_2}^{(0)} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) - r_{a_3 a_4}^{(0)} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}), \quad (2.22)$$

$$p'_{i,j} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) = r_{a_3 a_4}^{(0)} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - r_{a_1 a_2}^{(0)} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}). \quad (2.23)$$

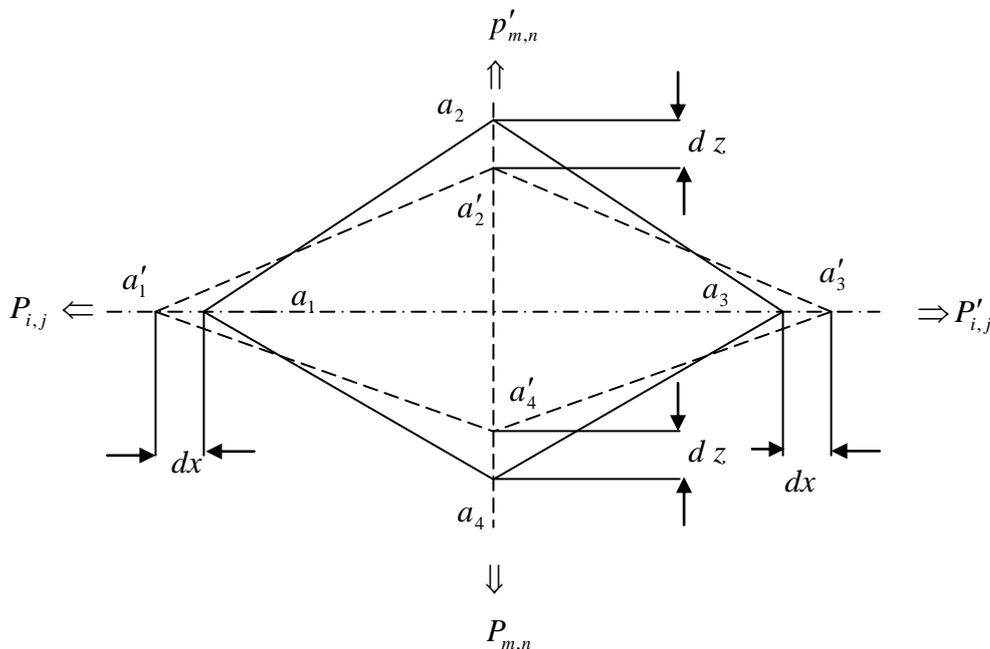


Рис.2.12. Общий случай деформации уточных нитей и нитей основы заданной ячейки

Отсюда

$$\begin{aligned}
& [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2})] \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) = \\
& = r_{a2a3}^{(Y)} [\cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - \\
& - \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})], \tag{2.24}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2})] \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) = \\
& = r_{a1a4}^{(Y)} [\cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - \\
& - \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2})], \tag{2.25}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4})] \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) = \\
& = r_{a1a2}^{(0)} [\cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - \\
& - \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4})], \tag{2.26}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4})] \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) = \\
& = r_{a3a4}^{(0)} [\cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - \\
& - \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4})] \tag{2.27}
\end{aligned}$$

ИЛИ

$$r_{a1a2}^{(0)} = \frac{\Delta_{a1a2}^{(0)}}{\Delta_{1,2}}, \quad r_{a3a4}^{(0)} = \frac{\Delta_{a3a4}^{(0)}}{\Delta_{3,4}}, \quad r_{a2a3}^{(Y)} = \frac{\Delta_{a2a3}^{(Y)}}{\Delta_{2,3}}, \quad r_{a1a4}^{(Y)} = \frac{\Delta_{a1a4}^{(Y)}}{\Delta_{1,4}}, \tag{2.28}$$

где

$$\begin{aligned}
\Delta_{a1a2}^{(0)} &= [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4})] \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}), \tag{2.29}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{a3a4}^{(0)} &= [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4})] \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}), \tag{2.30}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{a2a3}^{(Y)} &= [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2})] \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) + \\
& + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}), \tag{2.31}
\end{aligned}$$

$$\Delta_{a1a4}^{(Y)} = [p_{i,j} \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - p'_{m,n} \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2})] \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) + [p'_{i,j} \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - p_{m,n} \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4})] \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}), \quad (2.32)$$

$$\Delta_{1,2} = \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}), \quad (2.33)$$

$$\Delta_{3,4} = \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) - \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}), \quad (2.34)$$

$$\Delta_{2,3} = \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) - \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}), \quad (2.35)$$

$$\Delta_{1,4} = \cos(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \sin(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}) \cos(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \sin(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) - \sin(\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}) \cos(\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}) \sin(\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}) \cos(\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}). \quad (2.36)$$

Выражения (2.28), при известных из эксперимента значениях углов  $\alpha$  и  $\theta$ , служат для определения неизвестных натяжений  $r_{a1a2}^{(0)}$ ,  $r_{a1a4}^{(Y)}$ ,  $r_{a2a3}^{(Y)}$ ,  $r_{a3a4}^{(0)}$ .

Допустим, что первоначально углы  $\alpha_{1,2}$ ,  $\alpha_{2,3}$ ,  $\alpha_{3,4}$ ,  $\alpha_{1,4}$  имеют одинаковые значения  $\alpha_{1,2} = \alpha_{2,3} = \alpha_{3,4} = \alpha_{1,4} = \alpha = const$ , и в результате симметричного деформирования ячейки  $a_1 a_2 a_3 a_4$  изменятся на одинаковые по величине углы  $\theta_{1,2} = \theta_{2,3} = \theta_{3,4} = \theta_{1,4} = \theta = const$ , т.е. принимают значения  $\alpha'_{1,2} = \alpha'_{2,3} = \alpha'_{3,4} = \alpha'_{1,4} = \alpha - \theta = const$ . В этом случае, в рассматриваемом образце ткани нити основы и уточные нити равноправны и поэтому выражения (2.16)–(2.19) принимают следующий вид

$$p_{i,j} = r_{a1a2}^{(0)} \cos(\alpha - \theta) + r_{a1a4}^{(Y)} \cos(\alpha - \theta), \quad p'_{i,j} = r_{a2a3}^{(Y)} \cos(\alpha - \theta) + r_{a3a4}^{(0)} \cos(\alpha - \theta), \\ p'_{m,n} = r_{a1a2}^{(0)} \sin(\alpha - \theta) + r_{a2a3}^{(Y)} \sin(\alpha - \theta), \quad p_{m,n} = r_{a1a4}^{(Y)} \sin(\alpha - \theta) + r_{a3a4}^{(0)} \sin(\alpha - \theta).$$

Отсюда

$$p_{i,j} = p'_{i,j} = (r_{a1a2}^{(0)} + r_{a1a4}^{(Y)}) \cos(\alpha - \theta) = (r_{a2a3}^{(Y)} + r_{a3a4}^{(0)}) \cos(\alpha - \theta), \quad (2.37)$$

$$p_{m,n} = p'_{m,n} = (r_{a1a4}^{(Y)} + r_{a3a4}^{(0)}) \sin(\alpha - \theta) = (r_{a1a2}^{(0)} + r_{a2a3}^{(Y)}) \sin(\alpha - \theta). \quad (2.38)$$

Если натяжения нитей основы и уточных нитей одинаковы, т.е.

$r_{a1a2}^{(0)} = r_{a3a4}^{(0)} = r_{a1a4}^{(Y)} = r_{a2a3}^{(Y)}$ , то

$$p_{i,j} = p'_{i,j} = p_{m,n} = p'_{m,n}, \quad 2r_{a1a2}^{(0)} \cos(\alpha - \theta) = 2r_{a1a4}^{(Y)} \cos(\alpha - \theta), \quad (2.39)$$

$$2r_{a2a3}^{(Y)} \cos(\alpha - \theta) = 2r_{a3a4}^{(0)} \cos(\alpha - \theta). \quad (2.40)$$

Отсюда найдем следующее простое решение

$$r_{a1a2}^{(0)} = r_{a1a4}^{(Y)} = \frac{P_{i,j}}{2 \cos(\alpha - \theta)} = \frac{P'_{i,j}}{2 \cos(\alpha - \theta)}, \quad (2.41)$$

$$r_{a3a4}^{(0)} = r_{a2a3}^{(Y)} = \frac{P_{i,j}}{2 \cos(\alpha - \theta)} = \frac{P'_{i,j}}{2 \cos(\alpha - \theta)}. \quad (2.42)$$

Сравнивая это решение с решением предыдущей задачи, видим, что:

– в случае растяжения образца ткани вдоль нити основы или уточных нитей, натяжения нитей равняются внешней силе  $p_{i,j}$ ;

– в случае растяжения образца ткани под углом к нитям основы и уточным нитям в наиболее общем случае натяжения определяются по формулам (2.28), а в частном случае по (2.41) и (2.42).

Обозначим натяжения, возникающие в поперечных сечениях основных нитей и уточных нитей предыдущей задачи, – в задаче растяжения образца вдоль нитей основы или уточных нитей, через  $r_{i,j}^{(0)}(0)$  и  $r_{j,i}^{(Y)}(0)$ .

Найдем условия, при которых натяжения  $r_{i,j}^{(0)}(0)$  и  $r_{j,i}^{(Y)}(0)$  будут больше натяжения  $r_{a1a4}^{(0)}$ ,  $r_{a3a4}^{(0)}$ ,  $r_{a1a4}^{(Y)}$  и  $r_{a2a3}^{(Y)}$ , т.е.

$$r_{i,j}^{(0)}(0) > r_{a1a4}^{(0)} = r_{a3a4}^{(0)} \quad \text{и} \quad r_{j,i}^{(Y)}(0) > r_{a1a4}^{(Y)} = r_{a2a3}^{(Y)}.$$

Подстановка в последние соотношения выражения  $r_{i,j}^{(0)}(0) = r_{j,i}^{(Y)}(0) = p_{i,j}$  и выражения (2.41), (2.42) дает

$$r_{a1a2}^{(0)} = r_{a1a4}^{(Y)} = \frac{P_{i,j}}{2 \cos(\alpha - \theta)} < p_{i,j}.$$

Отсюда

$$\frac{1}{2 \cos(\alpha - \theta)} < 1 \quad \text{т.е.} \quad \cos(\alpha - \theta) > \frac{1}{2},$$

или

$$\alpha - \theta < 60^\circ. \quad (2.43)$$

При выполнении условия (2.43) натяжения  $r_{i,j}^{(0)}(0) = r_{j,i}^{(Y)}(0) = p_{i,j}$  будут меньше, чем натяжения, определяемые по формулам (2.41) и (2.42). Условие

(2.43) является необходимым условием возникновения частного случая  $r_{a_1a_2}^{(0)} = r_{a_3a_4}^{(0)} = r_{a_1a_4}^{(Y)} = r_{a_2a_3}^{(Y)}$  при  $p_{i,j} = p'_{i,j} = p_{m,n} = p'_{m,n}$ .

На рис. 2.9 – 2.16 приведены результаты проведенных численно экспериментальных исследований зависимости распределения натяжения между основными и уточными нитями заданной ячейки от значения и направления действия внешних сил  $p_{i,j}$ ,  $p'_{i,j}$ ,  $p_{m,n}$ ,  $p'_{m,n}$ . Все расчеты проводились по выражениям (2.28) – (2.36).

На рис. 2.13 – 2.15 исследуются зависимости натяжения нитей основы  $r_{a_1a_2}^{(0)}$ ,  $r_{a_3a_4}^{(0)}$  и уточных нитей  $r_{a_1a_4}^{(Y)}$ ,  $r_{a_2a_3}^{(Y)}$  от углов  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$ . Предполагается, что углы  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$  меняются в пределах  $5^\circ \leq \alpha_{1,2} - \theta_{1,2} = \alpha_{3,4} - \theta_{3,4} \leq 30^\circ$ , а углы  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$  также равны между собой и в каждой таблице принимают заданные значения:

- $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 60^\circ$  на рис.2.13;
- $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 70^\circ$  на рис.2.14;
- $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 80^\circ$  на рис.2.15.

Последние предположения означают, что в зависимости от технологических параметров ткани узловые точки рассматриваемой ячейки могут иметь различные координаты в плоскости  $(x, z)$ . Такие расположения узловых точек могут иметь места, например, в ткани переменной плотности.

Внешние силы  $p_{i,j}$ ,  $p'_{i,j}$ ,  $p_{m,n}$ ,  $p'_{m,n}$  имеют следующие фиксированные значения  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 30cH$ ,  $p_{m,n} = p'_{m,n} = 25cH$ , т.е.  $p_{i,j} = p'_{i,j} > p_{m,n} = p'_{m,n}$ .

Из рис. 2.13 – 2.15 вытекают следующие выводы. При принятых исходных данных:

- с увеличением углов  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$ , при фиксированных значениях углов  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$ ,  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$ , натяжения  $r_{a_1a_2}^{(0)}$  и  $r_{a_3a_4}^{(0)}$  нитей основы  $a_1a_2$  и  $a_3a_4$  возрастают, а натяжения  $r_{a_2a_3}^{(Y)}$  и  $r_{a_1a_4}^{(Y)}$  уточных нитей  $a_2a_3$  и  $a_1a_4$  убывают;

– с увеличением углов  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$ , при фиксированных значениях углов  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$ ,  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$ , натяжения  $r_{a_1a_2}^{(0)}$  и  $r_{a_3a_4}^{(0)}$  нитей основы  $a_1a_2$  и  $a_3a_4$  возрастают, а натяжения  $r_{a_2a_3}^{(y)}$  и  $r_{a_1a_4}^{(y)}$  уточных нитей  $a_2a_3$  и  $a_1a_4$  убывают.

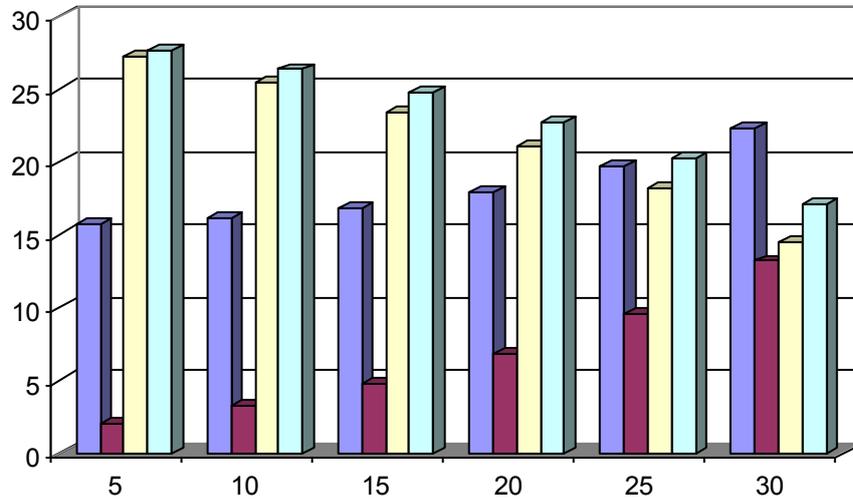


Рис.2.13. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}$ , полученные при  $p_{i,j}=p'_{i,j}=30$  сН,  $p_{m,n}=p'_{m,n}=25$  сН,  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}=60^0$ ,  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}=60^0$

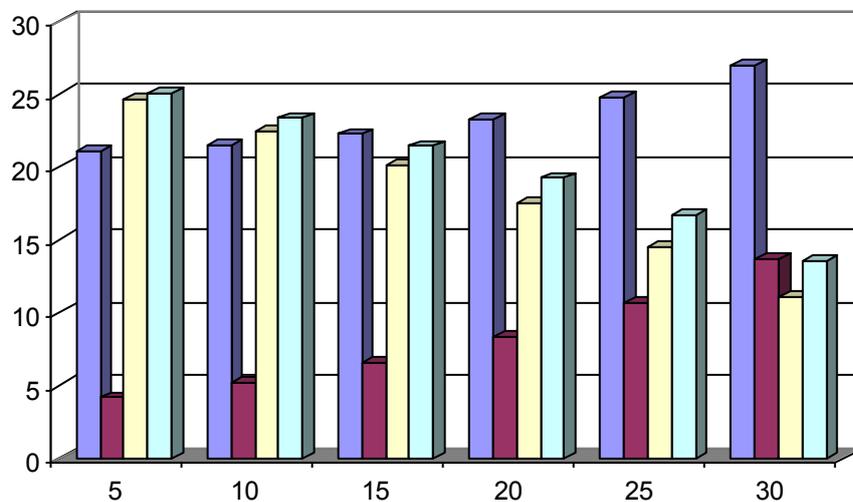


Рис.2.14. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}$ , полученные при  $p_{i,j}=p'_{i,j}=30$  сН,  $p_{m,n}=p'_{m,n}=25$  сН,  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}=70^0$ ,  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}=70^0$

Таким образом, при принятых исходных данных расчета, увеличения углов отклонения нитей основы и уточных нитей от горизонтальной оси приводят к возрастанию натяжения нитей основы и уменьшению натяжения уточных нитей.

| $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$<br>$\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}, \text{ град}$ | $r_{a1a2}^{(0)}, \text{ cH}$ | $r_{a3a4}^{(0)}, \text{ cH}$ | $r_{a2a3}^{(Y)}, \text{ cH}$ | $r_{a1a4}^{(Y)}, \text{ cH}$ |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 5  | 25.75                        | 5.124                        | 23.08                        | 23.52                        |
| 10   | 26.10                        | 5.889                        | 20.69                        | 21.56                        |
| 15   | 26.80                        | 6.939                        | 18.15                        | 19.45                        |
| 20   | 27.74                        | 8.321                        | 15.41                        | 17.14                        |
| 25   | 29.04                        | 10.10                        | 12.39                        | 14.57                        |
| 30   | 30.79                        | 12.39                        | 9.000                        | 11.65                        |

Рис.2.15. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$ , полученные при  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 30 \text{ cH}$ ,  $p_{m,n} = p'_{m,n} = 25 \text{ cH}$ ,  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = 80^\circ$ ,  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 80^\circ$

Исходные данные на рис.2.16 отличаются от предыдущих рис.2.13 – 2.15 тем, что здесь  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 40 \text{ cH}$ ,  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = 70^\circ$  и  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 70^\circ$ , а на рис.2.14 и 2.16 углы отклонения нитей основы и уточных нитей от горизонтальной оси принимают одинаковые значения. Сравнивая результаты упомянутых двух графиков, приходим к следующим выводам:

равномерные увеличения внешних сил  $p_{i,j}$  и  $p'_{i,j}$  приводят к возрастанию натяжения нитей основы и уменьшению натяжения уточных нитей. При исходных параметрах проводимых в данном случае экспериментальных исследований натяжение  $r_{a1a2}^{(0)}$  нити основы при  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2} = \alpha_{3,4} - \theta_{3,4} = 30^\circ$  рис.2.14 равен  $26,99 \text{ cH}$ , а на рис.2.16  $r_{a1a2}^{(0)} = 38,15 \text{ cH}$ . Аналогичные сравнения при  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2} = \alpha_{3,4} - \theta_{3,4} = 30^\circ$  значения натяжения нитей основы  $r_{a3a4}^{(0)}$  дают:

–  $r_{a3a4}^{(0)} = 13,70 \text{ cH}$  рис.2.14;

–  $r_{a3a4}^{(0)} = 28,32 \text{ cH}$  рис.2.16.

Отсюда видно, что натяжение  $r_{a3a4}^{(0)}$  возрастает значительно быстрее, чем натяжение  $r_{a1a2}^{(0)}$ .

Проводя аналогичные сравнения изменения натяжения уточных нитей, приходим к выводу, что при исходных данных эксперимента возрастания углов  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2}$ ,  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4}$  и внешних сил  $p_{i,j}$  и  $p'_{i,j}$ , натяжение  $r_{a2a3}^{(Y)}$  уточной нити  $a_2a_3$  значительно быстрее убывает, чем натяжение  $r_{a1a4}^{(Y)}$  уточной нити  $a_1a_4$ .

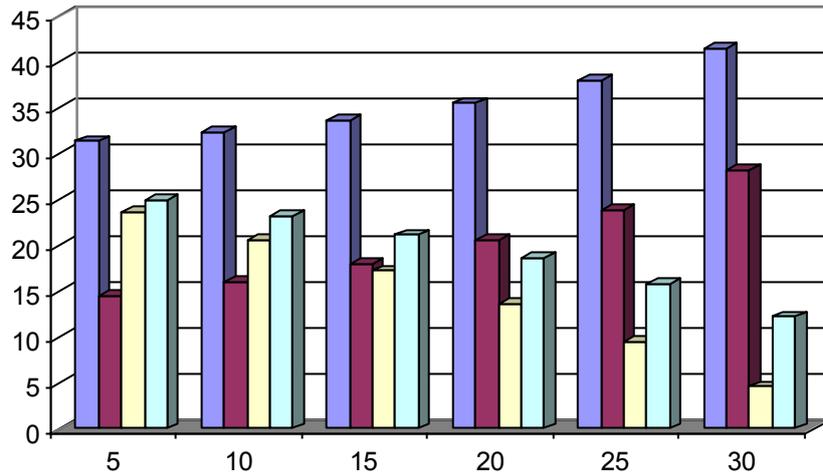


Рис.2.16. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}$ , полученные при  $p_{i,j}=p'_{i,j}=40 \text{ cH}$ ,  $p_{m,n}=p'_{m,n}=25 \text{ cH}$ ,  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}=70^0$ ,  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}=70^0$

Отметим, что на рис.2.16 при  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2} = \alpha_{3,4}-\theta_{3,4} = 30^\circ$  натяжение  $r_{a_1a_2}^{(0)}$  нити основы  $a_1a_2$  принимает значение  $41,61 \text{ cH}$ , т.е.  $r_{a_1a_2}^{(0)} > p_{i,j} = p'_{i,j} = 40 \text{ cH}$ . Последнее условие противоречит постановке и физическому смыслу задачи и, следовательно, при исходных данных (см.рис.2.16) углы  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}$  принимают меньшие, чем  $30^\circ$ , значения.

На рис.2.17 – 2.20 приведены результаты числовых экспериментальных исследований зависимости натяжения нитей основы, и уточных нитей рассматриваемой ячейки образца ткани от углов  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}$ . В этих таблицах углы  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}$  и  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}$  принимают заданные значения:

–  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2} = \alpha_{3,4}-\theta_{3,4} = 60^\circ$  рис.2.17;

–  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2} = \alpha_{3,4}-\theta_{3,4} = 70^\circ$  рис.2.18.

Углы  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}$  меняются в пределах от  $5^\circ$  до  $30^\circ$  ( $5^\circ \leq \alpha_{1,4}-\theta_{1,4} = \alpha_{2,3}-\theta_{2,3} \leq 30^\circ$ ), а внешние силы – принимают постоянные значения  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 40 \text{ cH}$  и  $p_{m,n} = p'_{m,n} = 25 \text{ cH}$ , т.е.  $p_{i,j} = p'_{i,j} > p_{m,n} = p'_{m,n}$ .

Из анализа данных этих таблиц следуют выводы:

– при возрастании углов  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}$  от  $5^0$  до  $30^\circ$  натяжения нитей основы существенно убывают, а натяжения уточных нитей возрастают;

– при увеличении углов  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$  от  $60^\circ$  до  $70^\circ$  натяжения нитей основы убывают, а натяжения уточных нитей возрастают.

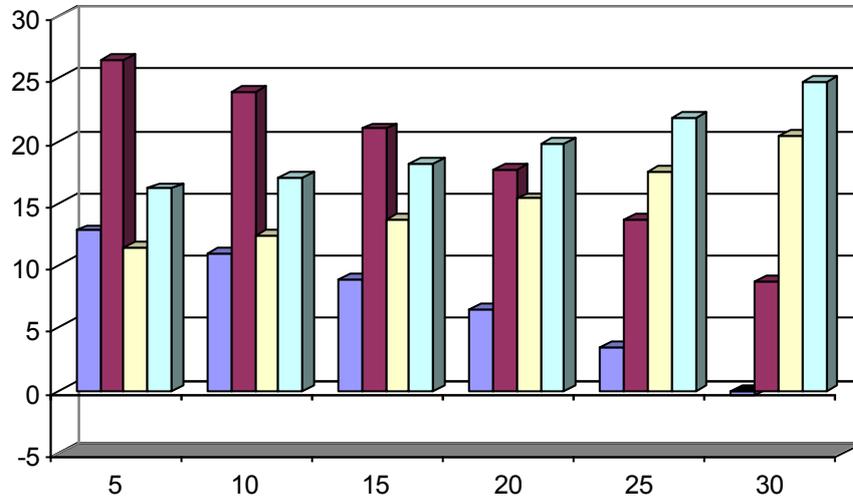


Рис.2.17. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$ , полученные при  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 40 \text{ cH}$ ,  $p_{m,n} = p'_{m,n} = 25 \text{ cH}$ ,  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2} = 60^\circ$ ,  $\alpha_{3,4} - \theta_{3,4} = 60^\circ$

На рис. 2.17 при  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 30^\circ$ , а на рис. 2.18 при  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 25^\circ$  и  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3} = 30^\circ$  натяжения  $r_{a_1 a_2}^{(0)}$  нити основы  $a_1 a_2$  оказываются отрицательными величинами. Условие  $r_{a_1 a_2}^{(0)} < 0$  противоречит физической постановке задачи. Следовательно, при исходных данных рис.2.17 углы  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$  принимают меньшие значения, чем  $30^\circ$ , а при исходных данных на рис.2.18 – меньшие, чем  $25^\circ$ .

На рис. 2.17 и 2.18 внешние силы удовлетворяют условиям  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 40 \text{ cH}$ ,  $p_{m,n} = p'_{m,n} = 25 \text{ cH}$ , т.е.  $p_{i,j} = p'_{i,j} > p_{m,n} = p'_{m,n}$ . Числовые расчеты на рис.2.19 и 2.20 проводились для случаев  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2} = \alpha_{3,4} - \theta_{3,4} = 60^\circ$  (рис.2.19),  $\alpha_{1,2} - \theta_{1,2} = \alpha_{3,4} - \theta_{3,4} = 70^\circ$  (рис.2.20) и  $p_{i,j} = p'_{i,j} = 30 \text{ cH}$ ,  $p_{m,n} = p'_{m,n} = 35 \text{ cH}$ , т.е.  $p_{i,j} = p'_{i,j} < p_{m,n} = p'_{m,n}$ .

Из рис. 2.17 - 2.20 следуют, что в обоих случаях  $p_{i,j} = p'_{i,j} > p_{m,n} = p'_{m,n}$  и  $p_{i,j} = p'_{i,j} < p_{m,n} = p'_{m,n}$  при возрастании углов  $\alpha_{1,4} - \theta_{1,4} = \alpha_{2,3} - \theta_{2,3}$  натяжения  $r_{a_1 a_2}^{(0)}$  и

$r_{a_3a_4}^{(0)}$  нитей основы  $a_1a_2$  и  $a_3a_4$  убывают, а натяжения  $r_{a_2a_3}^{(y)}$  и  $r_{a_1a_4}^{(y)}$  уточных нитей  $a_2a_3$  и  $a_1a_4$  возрастают.

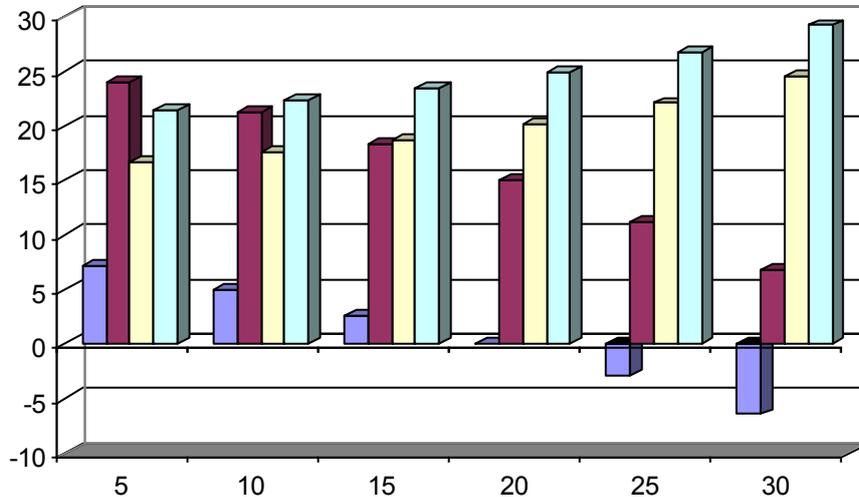


Рис.2.18. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}$ , полученные при  $p_{i,j}=p'_{i,j}=40$  сН,  $p_{m,n}=p'_{m,n}=25$  сН,  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}=70^\circ$ ,  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}=70^\circ$

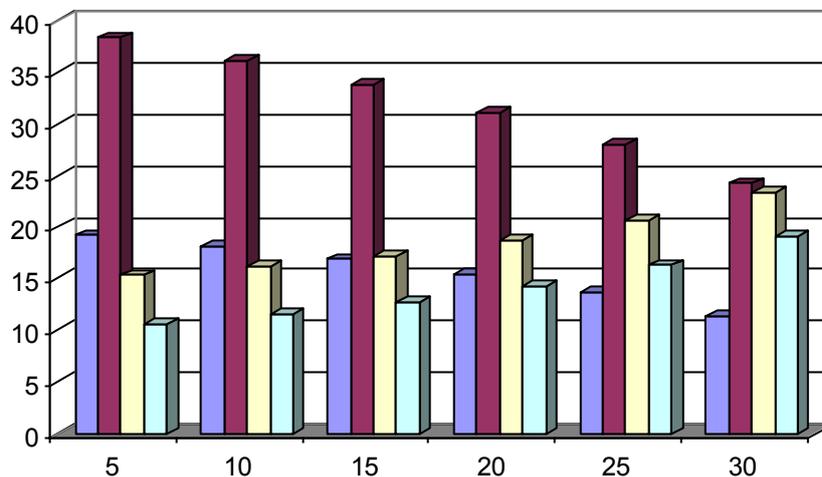


Рис.2.19. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}$ , полученные при  $p_{i,j}=p'_{i,j}=30$  сН,  $p_{m,n}=p'_{m,n}=35$  сН,  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}=60^\circ$ ,  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}=60^\circ$

Таким образом, при растяжении заданного образца ткани вдоль нитей основы или уточных нитей, натяжения соответствующих нитей равняются внешним силам  $p_{i,j}$  или  $p_{j,i}$  (см. п.2.1), а при растяжении под углом к

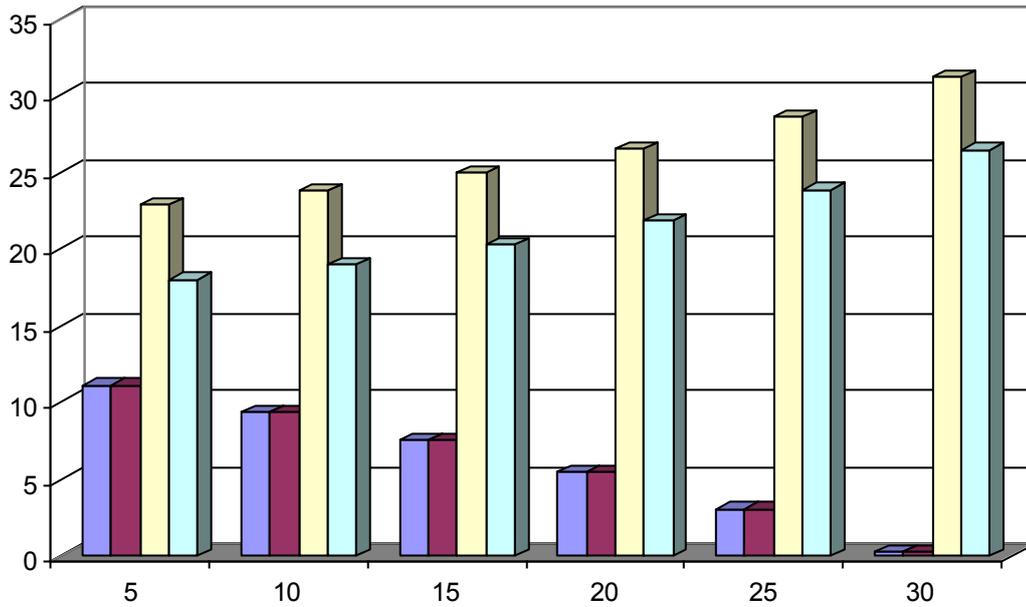


Рис.2.20. Зависимости натяжения нитей основы и уточных нитей от углов  $\alpha_{1,4}-\theta_{1,4}$  и  $\alpha_{2,3}-\theta_{2,3}$ , полученные при  $p_{i,j}=p'_{i,j}=30$  сН,  $p_{m,n}=p'_{m,n}=35$  сН,  $\alpha_{1,2}-\theta_{1,2}=70^0$ ,  $\alpha_{3,4}-\theta_{3,4}=70^0$

направлениям нитей, натяжения меньше внешних сил. При определенных технологических показателях, прочность ткани на растяжение вдоль диагоналей ячеек, образованных нитями основы и уточными нитями, принимает максимальные, а вдоль нитей основы и уточных нитей - минимальные значения.

В дальнейшем, способ нагружения образца ткани вдоль нитей основы назовем первым способом, вдоль уточных нитей – вторым способом, а под углом к нитям основы и уточным нитям – третьим способом.

Из теоретического анализа и сравнения результатов проведенных числовых экспериментальных исследований следует, что в третьем случае нагружения, силы  $p_{i,j}$  распределяются между нитями основы и уточными нитями. А, в - первых и вторых способах нагружения, внешние силы действуют только на нити основы (первый способ нагружения) или только на уточные нити (второй способ нагружения). В первом и втором случаях нагружения деформируются только нити основы или уточные нити. В третьем случае, можно нагрузить образец таким образом, чтобы нити основы и уточные нити деформировались одновременно и равнозначно. При третьем способе нагружения, будет обеспечено максимальное сопротивление образца на

растяжение. На практике, обеспечение нагружения ткани по третьему способу приводит к повышению прочности и срока эксплуатации готовых изделий.

Заметим, что на рис. 2.17 - 2.20, и в дальнейшем, при проведении численно-экспериментальных исследований, предполагается, что недеформированные уток и нити основы однородны, равноправны и имеют одинаковые модули упругости и площади поперечного сечения, т.е.

$$E_{i,j}^{(0)} = E_{j,i}^{(0)} = const, \quad F_{i,j}^{(0)} = F_{j,i}^{(0)} = const.$$

### 2.2.2. Методика определения деформации нитей заданной ячейки образца ткани

Найдем деформации нитей основы и уточных нитей заданной (произвольной) ячейки образца.

Деформации каждой из нитей будут (рис.2.10 и 2.12):

– абсолютные удлинения нитей основы вдоль первоначального направления

$$\Delta l_{a_1 a_2}^{(0)} = a'_1 a'_2 - a_1 a_2 = \frac{N_{1,2}^{(0)} a_{12}}{E_{1,2}^{(0)} F_{1,2}^{(0)}}, \quad \Delta l_{a_3 a_4}^{(0)} = a'_3 a'_4 - a_3 a_4 = \frac{N_{3,4}^{(0)} a_{34}}{E_{3,4}^{(0)} F_{3,4}^{(0)}}; \quad (2.44)$$

– абсолютные удлинения уточных нитей вдоль первоначального направления

$$\Delta l_{a_2 a_3}^{(Y)} = a'_2 a'_3 - a_2 a_3 = \frac{p_{2,3}^{(Y)} a_{23}}{E_{2,3}^{(Y)} F_{2,3}^{(Y)}}, \quad \Delta l_{a_1 a_4}^{(Y)} = a'_1 a'_4 - a_1 a_4 = \frac{N_{1,4}^{(Y)} a_{14}}{E_{1,4}^{(Y)} F_{1,4}^{(Y)}}; \quad (2.45)$$

– относительные деформации нитей основы вдоль первоначального направления

$$\varepsilon_{a_1 a_2}^{(0)} = \frac{a'_1 a'_2 - a_1 a_2}{a_1 a_2} = \frac{\sigma_{a_1 a_2}^{(0)}}{E_{a_1 a_2}^{(0)}}, \quad \varepsilon_{a_3 a_4}^{(0)} = \frac{a'_3 a'_4 - a_3 a_4}{a_3 a_4} = \frac{\sigma_{a_3 a_4}^{(0)}}{E_{a_3 a_4}^{(0)}}; \quad (2.46)$$

– относительные деформации уточных нитей вдоль первоначального направления

$$\varepsilon_{a_2 a_3}^{(Y)} = \frac{a'_2 a'_3 - a_2 a_3}{a_2 a_3} = \frac{\sigma_{a_2 a_3}^{(Y)}}{E_{a_2 a_3}^{(Y)}}, \quad \varepsilon_{a_1 a_4}^{(Y)} = \frac{a'_1 a'_4 - a_1 a_4}{a_1 a_4} = \frac{\sigma_{a_1 a_4}^{(Y)}}{E_{a_1 a_4}^{(Y)}}; \quad (2.47)$$

где  $N_{1,2}^{(0)}$ ,  $N_{3,4}^{(0)}$ ,  $N_{2,3}^{(Y)}$ ,  $N_{1,4}^{(Y)}$ ,  $\sigma_{a_1a_2}^{(0)} = \frac{N_{a_1a_2}^{(0)}}{F_{a_1a_2}^{(0)}}$ ,  $\sigma_{a_3a_4}^{(0)} = \frac{N_{a_3a_4}^{(0)}}{F_{a_3a_4}^{(0)}}$ ,  $\sigma_{a_2a_3}^{(Y)} = \frac{N_{a_2a_3}^{(Y)}}{F_{a_2a_3}^{(Y)}}$ ,  $\sigma_{a_1a_4}^{(Y)} = \frac{N_{a_1a_4}^{(Y)}}{F_{a_1a_4}^{(Y)}}$  –

продольные усилия и нормальные напряжения, возникающие в поперечных сечениях нитей основы и уточных нитей соответственно.

Выражения (2.44) – (2.47) характеризуют изменения длины нитей основы и уточных нитей вдоль первоначальных направлений. Однако, при растяжении образца ткани, одновременно изменяются длины и положения нитей относительно, например, изображенных на рис.2.10 и 2.12 координатных осей  $x$  и  $z$ . Изменения положения нитей при растяжении можно учитывать при помощи выражения проекции диагоналей ромбиков (ячеек). Приведем выражения проекции изменения диагоналей относительно координатных осей  $x$  и  $z$ .

Удлинения диагоналей элементарных ромбиков (ячеек):

– абсолютное и относительное удлинения горизонтальной диагонали  
ВДОЛЬ ОСИ  $x$

$$\begin{aligned} \Delta l_{1,3}^{(r)} &= (a'_1a'_2 + a'_2a'_3)\cos(\alpha - \theta) - (a_1a_2 + a_2a_3)\cos\alpha = \\ &= (a'_1a'_4 + a'_3a'_4)\cos(\alpha - \theta) - (a_1a_4 + a_3a_4)\cos\alpha, \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1,3}^{(r)} &= \frac{(a'_1a'_2 + a'_2a'_3)\cos(\alpha - \theta) - (a_1a_2 + a_2a_3)\cos\alpha}{(a_1a_2 + a_2a_3)\cos\alpha} = \\ &= \frac{(a'_1a'_4 + a'_3a'_4)\cos(\alpha - \theta) - (a_1a_4 + a_3a_4)\cos\alpha}{(a_1a_4 + a_3a_4)\cos\alpha}; \end{aligned} \quad (2.49)$$

– абсолютное и относительное удлинения вертикальной диагонали  
ОСИ  $z$

$$\begin{aligned} \Delta l_{1,3}^{(B)} &= (a'_1a'_2 + a'_2a'_3)\sin(\alpha - \theta) - (a_1a_2 + a_2a_3)\sin\alpha = \\ &= (a'_1a'_4 + a'_3a'_4)\sin(\alpha - \theta) - (a_1a_4 + a_3a_4)\sin\alpha; \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1,3}^{(B)} &= \frac{(a'_1a'_2 + a'_2a'_3)\sin(\alpha - \theta) - (a_1a_2 + a_2a_3)\sin\alpha}{(a_1a_2 + a_2a_3)\sin\alpha} = \\ &= \frac{(a'_1a'_4 + a'_3a'_4)\sin(\alpha - \theta) - (a_1a_4 + a_3a_4)\sin\alpha}{(a_1a_4 + a_3a_4)\sin\alpha}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

### 2.2.3. Алгоритм определения деформирования нитей произвольной заданной ячейки образца ткани

Полученные выше формулы (2.44) – (2.51) справедливы для одной элементарной ячейки, изображенной на рис.2.12. Для определения общего удлинения нитей и ткани в целом необходимо иметь методики определения и расчета деформации произвольной ячейки. Приведем аналогичные к (2.44)–(2.51) формулы для произвольной ячейки образца в целом. Предположим, что в результате растяжения, точки пересечения граней ромбика перемещаются симметрично относительно первоначального положения. Данное предположение будет иметь место, если все ячейки образца ткани симметричны, например, относительно координатных осей  $x$ ,  $z$ . В результате растяжения углы  $2\alpha_{i,j}$ ,  $2\alpha_{i+1,j+1}$  становятся равными  $2\alpha'_{i,j} = 2(\alpha_{i,j} - \theta_{i,j})$  и  $2\alpha'_{i+1,j+1} = 2(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1})$ . На рис.2.12 и 2.21 углы  $2\alpha_{i,j}$ ,  $2\alpha_{i+1,j+1}$ ,  $2\alpha'_{i,j} = 2(\alpha_{i,j} - \theta_{i,j})$  и  $2\alpha'_{i+1,j+1} = 2(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1})$  не указаны. Обозначим через (рис.2.21)

$$l_{i,j+1}^{(0)} = a_{i,j}a_{i,j+1}, \quad (l_{i,j+1}^{(0)})' = a'_{i,j}a'_{i,j+1}, \quad l_{i+1,j+1}^{(0)} = a_{i+1,j}a_{i+1,j+1}, \quad (l_{i+1,j+1}^{(0)})' = a'_{i+1,j}a'_{i+1,j+1}, \quad (2.52)$$

$$l_{j,i+1}^{(y)} = a_{i,j}a_{i+1,j}, \quad (l_{j,i+1}^{(y)})' = a'_{i,j}a'_{i+1,j}, \quad l_{j+1,i+1}^{(y)} = a_{i,j+1}a_{i+1,j+1}, \quad (l_{j+1,i+1}^{(y)})' = a'_{i,j+1}a'_{i+1,j+1} \quad (2.53)$$

первоначальные и текущие длины нити основы и уточной нити произвольной ячейки образца.

На рис.2.21 предполагается, что первоначально стороны  $a_{i,j}a_{i,j+1}$ ,  $a_{i+1,j}a_{i+1,j+1}$ ,  $a_{i,j+1}a_{i+1,j+1}$ ,  $a_{i,j}a_{i+1,j}$  рассматриваемой ячейки  $a_{i,j}a_{i,j+1}a_{i+1,j+1}a_{i+1,j}$  с горизонтальной  $x$  и вертикальной  $z$  осями образуют произвольные углы  $\alpha_{i,j+1}$ ,  $\alpha_{i+1,j+1}$ ,  $\alpha_{j+1,i+1}$ ,  $\alpha_{j,i+1}$  соответственно. А после деформации – рассматриваемая ячейка приобретает новую форму  $a'_{i,j}a'_{i,j+1}a'_{i+1,j+1}a'_{i+1,j}$ , стороны  $a'_{i,j}a'_{i,j+1}$ ,  $a'_{i+1,j}a'_{i+1,j+1}$ ,  $a'_{i,j+1}a'_{i+1,j+1}$ ,  $a'_{i,j}a'_{i+1,j}$  которой с осями  $x$  и  $z$  образуют новые углы  $\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}$ ,  $\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}$ ,  $\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}$ ,  $\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}$  соответственно. На рис.2.21 углы  $\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}$ ,  $\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}$ ,  $\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}$ ,  $\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}$  не указаны.

Абсолютные и относительные удлинения сторон ромбика (или параллелограмма), т.е:

– нити основы вдоль первоначального направления

$$\Delta l_{i,j}^{(0)} = (l_{i,j+1}^{(0)})' - l_{i,j+1}^{(0)} = a'_{i,j} a'_{i,j+1} - a_{i,j} a_{i,j+1} = \frac{N_{i,j+1}^{(0)} l_{i,j+1}^{(0)}}{E_{i,j+1}^{(0)} F_{i,j+1}^{(0)}}, \quad (2.54)$$

$$\varepsilon_{i,j}^{(0)} = \frac{(l_{i,j+1}^{(0)})' - l_{i,j+1}^{(0)}}{l_{i,j+1}^{(0)}} = \frac{a'_{i,j} a'_{i,j+1} - a_{i,j} a_{i,j+1}}{a_{i,j} a_{i,j+1}} = \frac{\sigma_{i,j+1}^{(0)}}{F_{i,j+1}^{(0)}}, \quad (2.55)$$

$$\Delta l_{i+1,j}^{(0)} = (l_{i+1,j+1}^{(0)})' - l_{i+1,j+1}^{(0)} = a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} - a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} = \frac{N_{i+1,j+1}^{(0)} l_{i+1,j+1}^{(0)}}{E_{i+1,j+1}^{(0)} F_{i+1,j+1}^{(0)}}, \quad (2.56)$$

$$\varepsilon_{i+1,j}^{(0)} = \frac{(l_{i+1,j+1}^{(0)})' - l_{i+1,j+1}^{(0)}}{l_{i+1,j+1}^{(0)}} = \frac{a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} - a_{i+1,j} a_{i+1,j+1}}{a_{i+1,j} a_{i+1,j+1}} = \frac{\sigma_{i+1,j+1}^{(0)}}{F_{i+1,j+1}^{(0)}}; \quad (2.57)$$

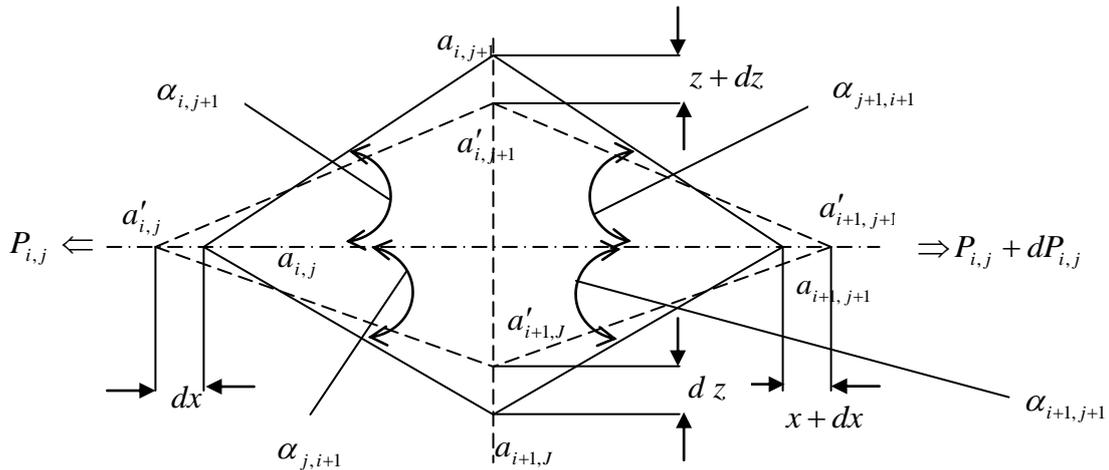


Рис.2.21. Схема деформации уточных нитей и нитей основы произвольной ячейки под действием сил  $P_{i,j}$  и  $P_{i,j} + dP_{i,j}$

$$\Delta l_{j,i}^{(Y)} = (l_{j,i+1}^{(Y)})' - l_{j,i+1}^{(Y)} = a'_{i,j} a'_{i+1,j} - a_{i,j} a_{i+1,j} = \frac{N_{j,i+1}^{(Y)} l_{j,i+1}^{(Y)}}{E_{j,i+1}^{(Y)} F_{j,i+1}^{(Y)}}, \quad (2.58)$$

$$\varepsilon_{j,i}^{(Y)} = \frac{(l_{j,i+1}^{(Y)})' - l_{j,i+1}^{(Y)}}{l_{j,i+1}^{(Y)}} = \frac{a'_{i,j} a'_{i+1,j} - a_{i,j} a_{i+1,j}}{a_{i,j} a_{i+1,j}} = \frac{\sigma_{j,i+1}^{(Y)}}{E_{j,i+1}^{(Y)}}, \quad (2.59)$$

$$\Delta l_{j+1,i}^{(Y)} = (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' - l_{j+1,i+1}^{(Y)} = a'_{j+1,i} a'_{j+1,i+1} - a_{j+1,i} a_{j+1,i+1} = \frac{N_{j+1,i+1}^{(Y)} l_{j+1,i+1}^{(Y)}}{E_{j+1,i+1}^{(Y)} F_{j+1,i+1}^{(Y)}}, \quad (2.60)$$

$$\varepsilon_{j+1,i}^{(Y)} = \frac{\left(l_{j+1,i+1}^{(Y)}\right)' - l_{j+1,i}^{(Y)}}{l_{j+1,i}^{(Y)}} = \frac{a'_{j+1,i} a'_{j+1,i+1} - a_{j+1,i} a_{j+1,i+1}}{a_{j+1,i} a_{j+1,i+1}} = \frac{\sigma_{j+1,i+1}^{(Y)}}{E_{j+1,i+1}^{(Y)}}. \quad (2.61)$$

Если растягивающие силы по оси  $x$  или  $z$  распределены неравномерно, узелки (точки пересечения нити основы с уточными нитями) перемещаются в плоскости  $(x, z)$ . В этом случае абсолютные и относительные удлинения горизонтальных и вертикальных диагоналей ромбика вдоль первоначальных направлений:

– абсолютное и относительное удлинения горизонтальной диагонали вдоль оси  $x$

$$\Delta l_{i,j}^{(r)} = a'_{i+1,j+1} a'_{i,j} - a_{i+1,j+1} a_{i,j}, \quad \varepsilon_{i,j}^{(r)} = \frac{a'_{i+1,j+1} a'_{i,j} - a_{i+1,j+1} a_{i,j}}{a_{i+1,j+1} a_{i,j}}; \quad (2.62)$$

– абсолютное и относительное удлинения вертикальной диагонали вдоль оси  $z$

$$\Delta l_{i,j}^{(B)} = a'_{i+1,j} a'_{i,j+1} - a_{i+1,j} a_{i,j+1}, \quad \varepsilon_{i,j}^{(B)} = \frac{a'_{i+1,j} a'_{i,j+1} - a_{i+1,j} a_{i,j+1}}{a_{i+1,j} a_{i,j+1}}. \quad (2.63)$$

#### 2.2.4. Методика определения абсолютного и относительного удлинения нитей и образца ткани

Общие абсолютные и относительные удлинения нити основы и уточной нити вдоль первоначальных направлений:

–  $i, j+1$  – ой нити основы

$$\Delta l_{i,j+1}^{(0)} = \sum_{i=1}^k \left[ \left(l_{i,j+1}^{(0)}\right)' - l_{i,j+1}^{(0)} \right], \quad \varepsilon_{i,j+1}^{(0)} = \frac{\sum_{i=1}^k \left[ \left(l_{i,j+1}^{(0)}\right)' - l_{i,j+1}^{(0)} \right]}{\sum_{i=1}^k l_{i,j+1}^{(0)}}; \quad (2.64)$$

–  $i+1, j+1$  – ой нити основы

$$\Delta l_{i+1,j+1}^{(0)} = \sum_{i=1}^k \left[ \left(l_{i+1,j+1}^{(0)}\right)' - l_{i+1,j+1}^{(0)} \right], \quad \varepsilon_{i+1,j+1}^{(0)} = \frac{\sum_{i=1}^k \left[ \left(l_{i+1,j+1}^{(0)}\right)' - l_{i+1,j+1}^{(0)} \right]}{\sum_{i=1}^k l_{i+1,j+1}^{(0)}}; \quad (2.65)$$

–  $j, i+1$  – ой уточной нити

$$\Delta l_{j,i+1}^{(Y)} = \sum_{j=1}^n \left[ \left( l_{j,i+1}^{(Y)} \right)' - l_{j,i+1}^{(Y)} \right], \quad \varepsilon_{j,i+1}^{(Y)} = \frac{\sum_{j=1}^n \left[ \left( l_{j,i+1}^{(Y)} \right)' - l_{j,i+1}^{(Y)} \right]}{\sum_{j=1}^n l_{j,i+1}^{(Y)}}; \quad (2.66)$$

–  $j+1, i+1$  – ой уточной нити

$$\Delta l_{j+1,i+1}^{(Y)} = \sum_{j=1}^n \left[ \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' - l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right], \quad \varepsilon_{j+1,i+1}^{(Y)} = \frac{\sum_{j=1}^n \left[ \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' - l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right]}{\sum_{j=1}^n l_{j+1,i+1}^{(Y)}}. \quad (2.67)$$

Выражения (2.64) – (2.67) служат для определения абсолютного и относительного удлинения заданных нитей основы и уточных нитей, а также рассматриваемого образца ткани вдоль первоначального направления. Однако, при растяжении одновременно меняются длины и направления обеих нитей. Приведем соотношения, с помощью которых можно будет определить реальные изменения расположения в плоскости растяжения и длины нитей и ткани.

Обозначим через  $(l_{i,j+1}^{(0)})_{GOP}$ ,  $(l_{i,j+1}^{(0)})_{BEP}$ ,  $(l_{i,j+1}^{(0)})'_{GOP}$ ,  $(l_{i,j+1}^{(0)})'_{BEP}$ ,  $(l_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP}$ ,  $(l_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP}$ ,  $(l_{i+1,j+1}^{(0)})'_{GOP}$ ,  $(l_{i+1,j+1}^{(0)})'_{BEP}$ ,  $(l_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP}$ ,  $(l_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP}$ ,  $(l_{j,i+1}^{(Y)})'_{GOP}$ ,  $(l_{j,i+1}^{(Y)})'_{BEP}$ ,  $(l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{GOP}$ ,  $(l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{BEP}$ ,  $(l_{j+1,i+1}^{(Y)})'_{GOP}$ ,  $(l_{j+1,i+1}^{(Y)})'_{BEP}$  – первоначальные и текущие длины проекции сторон  $l_{i,j+1}^{(0)}$ ,  $(l_{i,j+1}^{(0)})'$ ,  $l_{i+1,j+1}^{(0)}$ ,  $(l_{i+1,j+1}^{(0)})'$ ,  $l_{j,i+1}^{(Y)}$ ,  $(l_{j,i+1}^{(Y)})'$ ,  $l_{j+1,i+1}^{(Y)}$ ,  $(l_{j+1,i+1}^{(Y)})'$  ромбика произвольной элементарной ячейки на горизонтальной и вертикальной оси (рис.2.21). Тогда изменения длины и координаты расположения произвольной ячейки определяются при помощи следующих соотношений

$$(l_{i,j+1}^{(0)})_{GOP} = l_{i,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i,j+1} = a_{i,j} a_{i,j+1} \cos \alpha_{i,j+1}, \quad (2.68)$$

$$(l_{i,j+1}^{(0)})_{BEP} = l_{i,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i,j+1} = a_{i,j} a_{i,j+1} \sin \alpha_{i,j+1}, \quad (2.69)$$

$$\left( (l_{i,j+1}^{(0)})' \right)_{GOP} = (l_{i,j+1}^{(0)})' \cos(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) = a'_{i,j} a'_{i,j+1} \cos(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}), \quad (2.70)$$

$$\left( (l_{i,j+1}^{(0)})' \right)_{BEP} = (l_{i,j+1}^{(0)})' \sin(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) = a'_{i,j} a'_{i,j+1} \sin(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}), \quad (2.71)$$

$$(l_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP} = l_{i+1,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i+1,j+1} = a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{i+1,j+1}, \quad (2.72)$$

$$(l_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP} = l_{i+1,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i+1,j+1} = a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{i+1,j+1}, \quad (2.73)$$

$$\left( (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \right)_{GOP} = (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \cos(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) = a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} \cos(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}), \quad (2.74)$$

$$\left( (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \right)_{BEP} = (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \sin(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) = a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} \sin(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}), \quad (2.75)$$

$$(l_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP} = l_{j,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j,i+1} = a_{i,j} a_{i+1,j} \cos \alpha_{j,i+1}, \quad (2.76)$$

$$(l_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP} = l_{j,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j,i+1} = a_{i,j} a_{i+1,j} \sin \alpha_{j,i+1}, \quad (2.77)$$

$$\left( (l_{j,i+1}^{(Y)})' \right)_{GOP} = (l_{j,i+1}^{(Y)})' \cos(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) = a'_{i,j} a'_{i+1,j} \cos(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}), \quad (2.78)$$

$$\left( (l_{j,i+1}^{(Y)})' \right)_{BEP} = (l_{j,i+1}^{(Y)})' \sin(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) = a'_{i,j} a'_{i+1,j} \sin(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}), \quad (2.79)$$

$$(l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{GOP} = l_{j+1,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j+1,i+1} = a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{j+1,i+1}, \quad (2.80)$$

$$(l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{BEP} = l_{j+1,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j+1,i+1} = a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{j+1,i+1}, \quad (2.81)$$

$$\left( (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \right)_{GOP} = (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \cos(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) = a'_{i,j+1} a'_{i+1,j+1} \cos(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}), \quad (2.82)$$

$$\left( (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \right)_{BEP} = (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \sin(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) = a'_{i,j+1} a'_{i+1,j+1} \sin(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}). \quad (2.83)$$

Выражения (2.68)–(2.83) служат для определения изменения координаты точек пересечения граней в плоскости  $(x, z)$  и длины нитей произвольной ячейки рассматриваемого образца ткани. Используя эти выражения можно написать формулы для определения значения проекции на оси  $x$  и  $z$  общих абсолютных и относительных удлинений произвольных нитей основы и уточных нитей:

– проекция на горизонтальной и вертикальной оси абсолютного и относительного удлинения нити основы  $a_{i,j} a_{i,j+1}$

$$\begin{aligned} (\Delta l_{i,j+1}^{(0)})_{GOP} &= \sum_{i=1}^k \left[ \left( (l_{i,j+1}^{(0)})' \right)_{GOP} - (l_{i,j+1}^{(0)})_{GOP} \right] = \sum_{i=1}^k \left[ (l_{i,j+1}^{(0)})' \cos(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - l_{i,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i,j+1} \right] = \\ &= \sum_{i=1}^k \left[ a'_{i,j} a'_{i,j+1} \cos(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - a_{i,j} a_{i,j+1} \cos \alpha_{i,j+1} \right], \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} (\Delta l_{i,j+1}^{(0)})_{BEP} &= \sum_{i=1}^k \left[ \left( (l_{i,j+1}^{(0)})' \right)_{BEP} - (l_{i,j+1}^{(0)})_{BEP} \right] = \sum_{i=1}^k \left[ (l_{i,j+1}^{(0)})' \sin(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - l_{i,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i,j+1} \right] = \\ &= \sum_{i=1}^k \left[ a'_{i,j} a'_{i,j+1} \sin(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - a_{i,j} a_{i,j+1} \sin \alpha_{i,j+1} \right], \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned}
(\mathcal{E}_{i,j+1}^{(0)})_{GOP} &= \sum_{i=1}^k \frac{\left( (l_{i,j+1}^{(0)})' \right)_{GOP} - (l_{i,j+1}^{(0)})_{GOP}}{(l_{i,j+1}^{(0)})_{GOP}} = \sum_{i=1}^k \frac{(l_{i,j+1}^{(0)})' \cos(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - l_{i,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i,j+1}}{l_{i,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i,j+1}} = \\
&= \sum_{i=1}^k \frac{a'_{i,j} a'_{i,j+1} \cos(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - a_{i,j} a_{i,j+1} \cos \alpha_{i,j+1}}{a_{i,j} a_{i,j+1} \cos \alpha_{i,j+1}}, \tag{2.86}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\mathcal{E}_{i,j+1}^{(0)})_{BEP} &= \sum_{i=1}^k \frac{\left( (l_{i,j+1}^{(0)})' \right)_{BEP} - (l_{i,j+1}^{(0)})_{BEP}}{(l_{i,j+1}^{(0)})_{BEP}} = \sum_{i=1}^k \frac{(l_{i,j+1}^{(0)})' \sin(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - l_{i,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i,j+1}}{l_{i,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i,j+1}} = \\
&= \sum_{i=1}^k \frac{a'_{i,j} a'_{i,j+1} \sin(\alpha_{i,j+1} - \theta_{i,j+1}) - a_{i,j} a_{i,j+1} \sin \alpha_{i,j+1}}{a_{i,j} a_{i,j+1} \sin \alpha_{i,j+1}}; \tag{2.87}
\end{aligned}$$

– проекция на горизонтальной и вертикальной оси абсолютного и относительного удлинения нити основы  $a_{i+1,j} a_{i+1,j+1}$

$$\begin{aligned}
(\Delta l_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP} &= \sum_{i=1}^k \left[ \left( (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \right)_{GOP} - (l_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP} \right] = \sum_{i=1}^k \left[ (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \cos(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - \right. \\
&\left. - l_{i+1,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i+1,j+1} \right] = \sum_{i=1}^k \left[ a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} \cos(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{i+1,j+1} \right], \tag{2.88}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\Delta l_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP} &= \sum_{i=1}^k \left[ \left( (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \right)_{BEP} - (l_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP} \right] = \sum_{i=1}^k \left[ (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \sin(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - \right. \\
&\left. - l_{i+1,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i+1,j+1} \right] = \sum_{i=1}^k \left[ a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} \sin(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{i+1,j+1} \right], \tag{2.89}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\mathcal{E}_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP} &= \sum_{i=1}^k \frac{\left( (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \right)_{GOP} - (l_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP}}{(l_{i+1,j+1}^{(0)})_{GOP}} = \\
&= \sum_{i=1}^k \frac{(l_{i+1,j+1}^{(0)})' \cos(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - l_{i+1,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i+1,j+1}}{l_{i+1,j+1}^{(0)} \cos \alpha_{i+1,j+1}} = \\
&= \sum_{i=1}^k \frac{a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} \cos(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{i+1,j+1}}{a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{i+1,j+1}}, \tag{2.90}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\mathcal{E}_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP} &= \sum_{i=1}^k \frac{\left( (l_{i+1,j+1}^{(0)})' \right)_{BEP} - (l_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP}}{(l_{i+1,j+1}^{(0)})_{BEP}} = \\
&= \sum_{i=1}^k \frac{(l_{i+1,j+1}^{(0)})' \sin(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - l_{i+1,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i+1,j+1}}{l_{i+1,j+1}^{(0)} \sin \alpha_{i+1,j+1}} =
\end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^k \frac{a'_{i+1,j} a'_{i+1,j+1} \sin(\alpha_{i+1,j+1} - \theta_{i+1,j+1}) - a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{i+1,j+1}}{a_{i+1,j} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{i+1,j+1}}; \quad (2.91)$$

– проекция на горизонтальной и вертикальной оси абсолютного и относительного удлинения уточной нити  $a_{i,j+1} a_{i+1,j+1}$

$$\begin{aligned} (\Delta l_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP} &= \sum_{j=1}^k \left[ \left( (l_{j,i+1}^{(Y)})' \right)_{GOP} - (l_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP} \right] = \sum_{j=1}^k \left[ (l_{j,i+1}^{(Y)})' \cos(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - l_{j,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j,i+1} \right] = \\ &= \sum_{j=1}^k \left[ a'_{i,j} a'_{i+1,j} \cos(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - a_{i,j} a_{i+1,j} \cos \alpha_{j,i+1} \right], \end{aligned} \quad (2.92)$$

$$\begin{aligned} (\Delta l_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP} &= \sum_{j=1}^k \left[ \left( (l_{j,i+1}^{(Y)})' \right)_{BEP} - (l_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP} \right] = \sum_{j=1}^k \left[ (l_{j,i+1}^{(Y)})' \sin(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - l_{j,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j,i+1} \right] = \\ &= \sum_{j=1}^k \left[ a'_{i,j} a'_{i+1,j} \sin(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - a_{i,j} a_{i+1,j} \sin \alpha_{j,i+1} \right], \end{aligned} \quad (2.93)$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP} &= \sum_{j=1}^k \frac{\left( (l_{j,i+1}^{(Y)})' \right)_{GOP} - (l_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP}}{(l_{j,i+1}^{(Y)})_{GOP}} = \sum_{j=1}^k \frac{(l_{j,i+1}^{(Y)})' \cos(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - l_{j,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j,i+1}}{l_{j,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j,i+1}} = \\ &= \sum_{j=1}^k \frac{a'_{i,j} a'_{i+1,j} \cos(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - a_{i,j} a_{i+1,j} \cos \alpha_{j,i+1}}{a_{i,j} a_{i+1,j} \cos \alpha_{j,i+1}}, \end{aligned} \quad (2.94)$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP} &= \sum_{j=1}^k \frac{\left( (l_{j,i+1}^{(Y)})' \right)_{BEP} - (l_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP}}{(l_{j,i+1}^{(Y)})_{BEP}} = \sum_{j=1}^k \frac{(l_{j,i+1}^{(Y)})' \sin(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - l_{j,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j,i+1}}{l_{j,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j,i+1}} = \\ &= \sum_{j=1}^k \frac{a'_{i,j} a'_{i+1,j} \sin(\alpha_{j,i+1} - \theta_{j,i+1}) - a_{i,j} a_{i+1,j} \sin \alpha_{j,i+1}}{a_{i,j} a_{i+1,j} \sin \alpha_{j,i+1}}; \end{aligned} \quad (2.95)$$

– проекция на горизонтальной и вертикальной оси абсолютного и относительного удлинения уточной нити  $a_{i,j} a_{i+1,j}$

$$\begin{aligned} (\Delta l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{GOP} &= \sum_{j=1}^k \left[ \left( (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \right)_{GOP} - (l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{GOP} \right] = \\ &= \sum_{j=1}^k \left[ (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \cos(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - l_{j+1,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j+1,i+1} \right] = \\ &= \sum_{j=1}^k \left[ a'_{i,j+1} a'_{i+1,j+1} \cos(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{j+1,i+1} \right], \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$(\Delta l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{BEP} = \sum_{j=1}^k \left[ \left( (l_{j+1,i+1}^{(Y)})' \right)_{BEP} - (l_{j+1,i+1}^{(Y)})_{BEP} \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{j=1}^k \left[ \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' \sin(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - l_{j+1,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j+1,i+1} \right] = \\
&= \sum_{j=1}^k \left[ a'_{i,j+1} a'_{i+1,j+1} \sin(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{j+1,i+1} \right], \tag{2.97}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left( \varepsilon_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP} &= \sum_{j=1}^k \frac{\left( \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' \right)_{GOP} - \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP}}{\left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP}} = \\
&= \sum_{j=1}^k \frac{\left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' \cos(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - l_{j+1,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j+1,i+1}}{l_{j+1,i+1}^{(Y)} \cos \alpha_{j+1,i+1}} = \\
&= \sum_{j=1}^k \frac{a'_{i,j+1} a'_{i+1,j+1} \cos(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{j+1,i+1}}{a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \cos \alpha_{j+1,i+1}}, \tag{2.98}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left( \varepsilon_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP} &= \sum_{j=1}^k \frac{\left( \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' \right)_{BEP} - \left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP}}{\left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP}} = \\
&= \sum_{j=1}^k \frac{\left( l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)' \sin(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - l_{j+1,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j+1,i+1}}{l_{j+1,i+1}^{(Y)} \sin \alpha_{j+1,i+1}} = \\
&= \sum_{j=1}^k \frac{a'_{i,j+1} a'_{i+1,j+1} \sin(\alpha_{j+1,i+1} - \theta_{j+1,i+1}) - a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{j+1,i+1}}{a_{i,j+1} a_{i+1,j+1} \sin \alpha_{j+1,i+1}}. \tag{2.99}
\end{aligned}$$

Согласно принципу независимости действия сил, проекции на горизонтальной и вертикальной оси составляющих полных перемещений правых концов нитей вдоль первоначальных направлений будут следующими:

– НИТИ ОСНОВЫ  $a_{i,j} a_{i,j+1}$

$$\left( \delta_{i,j+1}^{(0)} \right)_{GOP} = \left( \Delta l_{i,j+1}^{(0)} \right)_{GOP}, \quad \left( \delta_{i,j+1}^{(0)} \right)_{BEP} = \left( \Delta l_{i,j+1}^{(0)} \right)_{BEP}; \tag{2.100}$$

– НИТИ ОСНОВЫ  $a_{i+1,j} a_{i+1,j+1}$

$$\left( \delta_{i+1,j+1}^{(0)} \right)_{GOP} = \left( \Delta l_{i+1,j+1}^{(0)} \right)_{GOP}, \quad \left( \delta_{i+1,j+1}^{(0)} \right)_{BEP} = \left( \Delta l_{i+1,j+1}^{(0)} \right)_{BEP}; \tag{2.101}$$

– УТОЧНОЙ НИТИ  $a_{i,j+1} a_{i+1,j+1}$

$$\left( \delta_{j,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP} = \left( \Delta l_{j,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP}, \quad \left( \delta_{j,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP} = \left( \Delta l_{j,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP}; \tag{2.102}$$

– УТОЧНОЙ НИТИ  $a_{i,j} a_{i+1,j}$

$$\left( \delta_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP} = \left( \Delta l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{GOP}, \quad \left( \delta_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP} = \left( \Delta l_{j+1,i+1}^{(Y)} \right)_{BEP}. \tag{2.103}$$

Полные перемещения правых концов нитей вдоль направления растяжения, т.е. оси  $x$ , равны геометрической сумме составляющих (2.100)–(2.103):

– НИТИ ОСНОВЫ  $a_{i,j}a_{i,j+1}$

$$\delta_{i,j+1}^{(0)} = \sqrt{\left[ (\delta_{i,j+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\delta_{i,j+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2} = \sqrt{\left[ (\Delta l_{i,j+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\Delta l_{i,j+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2}, \quad (2.104)$$

– НИТИ ОСНОВЫ  $a_{i+1,j}a_{i+1,j+1}$

$$\delta_{i+1,j+1}^{(0)} = \sqrt{\left[ (\delta_{i+1,j+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\delta_{i+1,j+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2} = \sqrt{\left[ (\Delta l_{i+1,j+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\Delta l_{i+1,j+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2}, \quad (2.105)$$

– УТОЧНОЙ НИТИ  $a_{i,j+1}a_{i+1,j+1}$

$$\delta_{j,i+1}^{(0)} = \sqrt{\left[ (\delta_{j,i+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\delta_{j,i+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2} = \sqrt{\left[ (\Delta l_{j,i+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\Delta l_{j,i+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2}, \quad (2.106)$$

– УТОЧНОЙ НИТИ  $a_{i,j}a_{i+1,j}$

$$\delta_{j+1,i+1}^{(0)} = \sqrt{\left[ (\delta_{j+1,i+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\delta_{j+1,i+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2} = \sqrt{\left[ (\Delta l_{j+1,i+1}^{(0)})_{Гор} \right]^2 + \left[ (\Delta l_{j+1,i+1}^{(0)})_{БЕР} \right]^2}. \quad (2.107)$$

Полученные выше формулы и построенные для трех случаев нагружения зависимости, позволяют определить текущие напряженные состояния и значения прочности образца заданной ткани.

### 2.3. Влияние начальных параметров натяжения нитей и образца ткани

Граничные условия – начальные параметры, имеющие место на неподвижной – жестко закрепленной границе и на границе приложения внешней силы оказывают существенное влияние на распределение натяжения по нитям основы и уточным нитям. На рис.2.22 и 2.23 приведены две простейшие способы закрепления левого конца рассматриваемой ячейки  $a_1a_2a_3a_4$ . На рис.2.22 левый конец ячейки  $a_1a_2a_3a_4$  закреплен в точке  $a_1$ , а на рис.2.23 – в точках  $a_2$  и  $a_4$ . В обеих схемах силы  $P_{i,j}$  одновременно приложены уточной нити  $a_2a_3$  и нити основы  $a_3a_4$ .

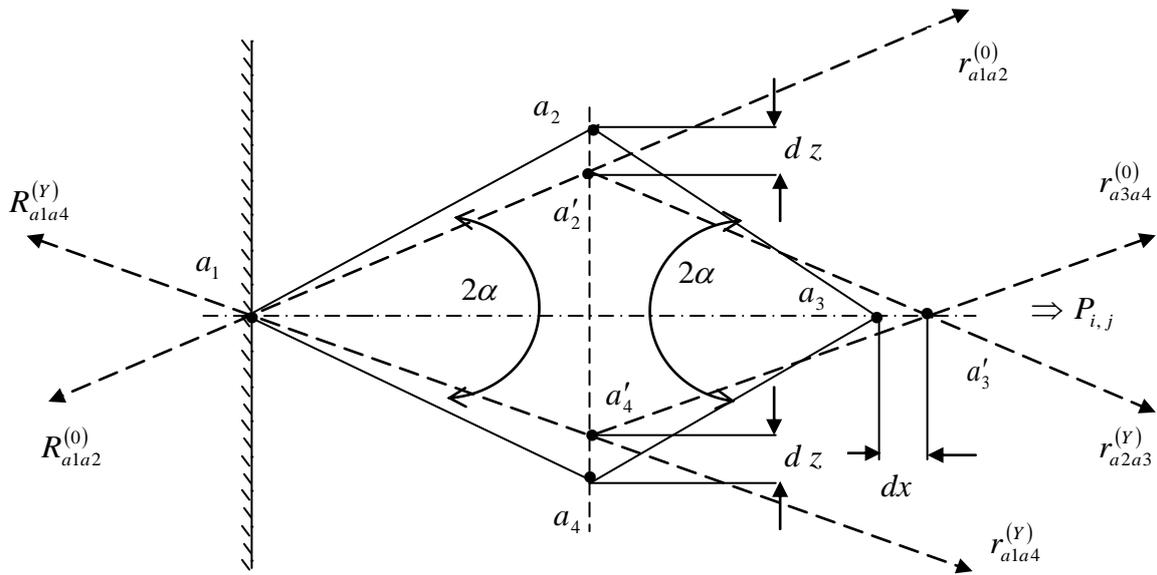


Рис.2.22. Схема закрепления ячейки по точке  $a_1$

На рис.2.22 нити основы  $a_3a_4$  и уточная нить  $a_2a_3$  испытывают большие, чем нити основы  $a_1a_2$  и уточная нить  $a_1a_4$ , натяжения. Действия силы  $P_{i,j}$  нитям  $a_2a_4$  и  $a_3a_4$  передаются непосредственно, а нитям  $a_1a_2$  и  $a_1a_4$  передаются в узловых точках через «коэффициент передачи  $\nu$ ». В простейшем случае, можно предположить, что нити основы и уточные нити в узловых точках связаны между собой шарнирно, и натяжения  $r_{a_2a_3}$ ,  $r_{a_4a_3}$  нитей  $a'_2a'_3$ ,  $a'_4a'_3$  зависят от натяжения  $r_{a_1a_2}$ ,  $r_{a_4a_1}$  нитей  $a'_1a'_2$ ,  $a'_4a'_1$  линейно, т.е.

$$r_{a_1a_2} = \nu_{a_1a_2} r_{a_2a_3} \quad \text{и} \quad r_{a_1a_4} = \nu_{a_1a_4} r_{a_3a_4}, \quad (2.108)$$

где  $\nu_{a_1a_2} < 1$  и  $\nu_{a_1a_4} < 1$  – коэффициенты передачи действия натяжения  $r_{a_2a_3}$ ,  $r_{a_4a_3}$  нитей  $a'_2a'_3$ ,  $a'_4a'_3$  нитям  $a'_1a'_2$ ,  $a'_4a'_1$ . На рис.2.22, 2.23 и в дальнейшем шарнирные крепления обозначаются жирной точкой.

Значения коэффициентов  $\nu_{a_1a_2}$  и  $\nu_{a_1a_4}$  зависят от условия контакта нитей в узловых точках. В частности, при идеальной связи нитей в точках  $a_2$  и  $a_4$ , может иметь место соотношение

$$\nu_{a_1a_2} = \nu_{a_1a_4}. \quad (2.109)$$

Только в идеальном случае крепления, линия действия равнодействующего  $R_{i,j}$  реактивных сил  $R_{a_1a_2}^{(0)}$  и  $R_{a_1a_4}^{(y)}$ , эквивалентного по величине сумме

$$(R_{a1a2}^{(0)} + R_{a1a4}^{(Y)})\cos(\alpha - \theta),$$

совпадает с линией действия внешней силы  $P_{i,j}$ . Общая линия действия сил  $R_{i,j}$  и  $P_{i,j}$  будет совпадать с горизонтальной диагональю ромбика (параллелограмма).

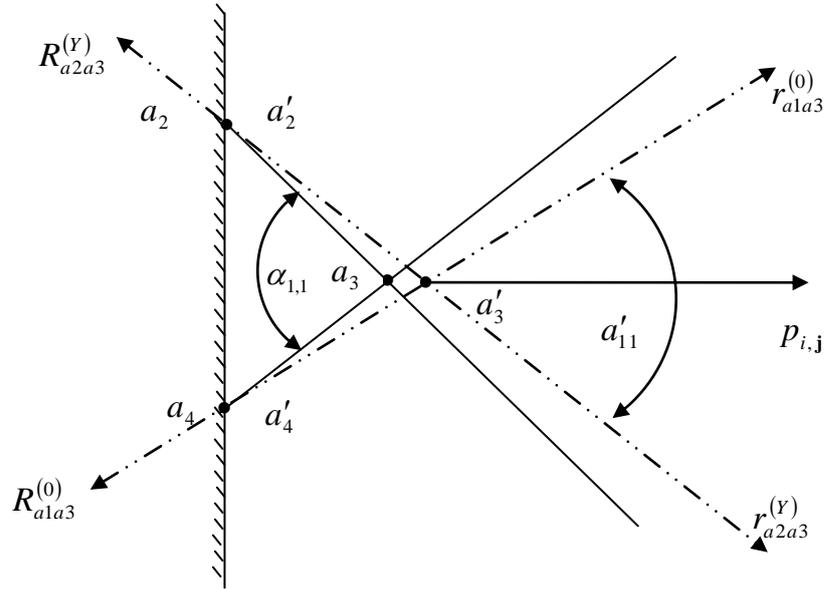


Рис.2.23. Схема закрепления ячейки по точкам  $a_2$  и  $a_4$

Согласно методу сечения, уравнения равновесия для рассматриваемой ячейки принимает вид (рис.2.22)

$$\sum_{S=1}^Q (F_X)_S = 0, \quad \sum_{S=1}^Q (F_Z)_S = 0$$

ИЛИ

$$P_{i,j} - \sum_{s=1}^2 (R_X)_S = (1 - \nu_{a1a2})r_{a2a3} \cos(\alpha - \theta) + (1 - \nu_{a1a4})r_{a3a4} \cos(\alpha - \theta),$$

$$\sum_{s=1}^2 (R_Z)_S = (1 - \nu_{a1a2})r_{a2a3} \sin(\alpha - \theta) + (1 - \nu_{a1a4})r_{a3a4} \sin(\alpha - \theta),$$

где  $F_X$ ,  $F_Z$ ,  $S$  – обозначения проекции на оси  $x$ ,  $z$  и количества активных и реактивных сил, действующих на рассматриваемую ячейку.

Отсюда

$$P_{i,j} - (R_{a1a2}^{(0)} + R_{a1a4}^{(Y)})\cos(\alpha - \theta) = (1 - \nu_{a1a2})r_{a2a3} \cos(\alpha - \theta) + (1 - \nu_{a1a4})r_{a3a4} \cos(\alpha - \theta). \quad (2.110)$$

$$(R_{a1a2}^{(0)} - R_{a1a4}^{(Y)})\sin(\alpha - \theta) = -(1 + \nu_{a1a2})r_{a2a3} \sin(\alpha - \theta) + (1 + \nu_{a1a4})r_{a3a4} \sin(\alpha - \theta). \quad (2.111)$$

В общем случае, в уравнения (2.110) и (2.111) входят следующие пять неизвестных: —  $R_{i,j}$ ,  $v_{a1a2}$ ,  $v_{a1a4}$ ,  $r_{a2a3}$ ,  $r_{a3a4}$ , и задача является трижды неопределимой. В частности, если коэффициенты  $v_{a1a2}$ ,  $v_{a1a4}$  известны из эксперимента, и условия (2.108) выполняются, то уравнения (2.110) и (2.111) являются один раз неопределимыми.

Если ячейка закреплена по точкам  $a_2$  и  $a_4$ , как это показано на рис.2.23, то уравнения (2.110) и (2.111) принимают вид

$$P_{i,j} - R_{a2a3}^{(y)} \cos(\alpha_{11} - \theta_{11}) - R_{a3a4}^{(0)} \cos(\alpha_{11} - \theta_{11}) = r_{a2a3} \cos(\alpha - \theta) + r_{a3a4} \cos(\alpha - \theta), \quad (2.112)$$

$$R_{a2a3}^{(y)} \sin(\alpha_{11} - \theta_{11}) - R_{a3a4}^{(0)} \sin(\alpha_{11} - \theta_{11}) = r_{a2a3} \sin(\alpha - \theta) - r_{a3a4} \sin(\alpha - \theta). \quad (2.113)$$

В данной системе составляющие  $R_{a2a3}^{(y)}$ ,  $R_{a3a4}^{(0)}$ ,  $r_{a2a3}$  и  $r_{a3a4}$  являются неизвестными. Таким образом, в идеальном случае, уравнения (2.112) и (2.113), в отличие от предыдущей системы, являются дважды неопределимыми.

До сих пор предполагалось, что внешняя сила  $P_{i,j}$  приложена к некоторой узловой точке образца ткани и направлена вдоль горизонтальной диагонали заданной ячейки. Если допустить, что направление внешней силы  $P_{i,j}$  образует с горизонтальной осью  $x$  угол  $\beta_{i,j}$  (рис.2.24), то направление горизонтальной первоначально диагонали, после нагружения будет совпадать с заданным направлением силы  $P_{i,j}$ . Введем новую координатную систему  $(x', z')$  так, чтобы направление оси  $x'$  совпадает с направлением силы  $P_{i,j}$ . Тогда связь координаты точек горизонтальной диагонали в старой  $(x, z)$  и новой  $(x', z')$  системах устанавливаются по известной формуле

$$x' = x \cos \beta_{i,j} - z \sin \beta_{i,j}, \quad z' = z \cos \beta_{i,j} + x \sin \beta_{i,j}. \quad (2.114)$$

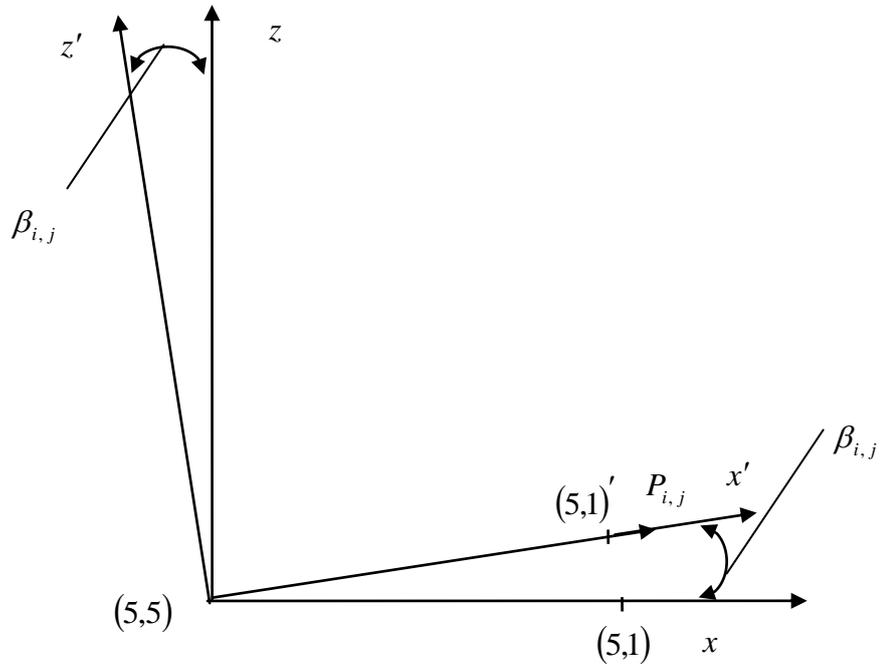


Рис.2.24. Схема действия внешней силы  $P_{i,j}$  под углом  $\beta_{i,j}$  к диагонали заданной ячейки образца ткани

Пусть в схемах расчета, изображенных на рис.2.22 – 2.23, линии действия внешних сил  $P_{i,j}$  с горизонтальной осью  $x$  образуют углы  $\beta_{i,j}$  (рис.2.25 – 2.26).

Тогда выражения (2.110) – (2.113) принимают вид соответственно

$$\begin{aligned}
 & P_{i,j} \cos \beta_{i,j} - (R_{a1a2}^{(0)} + R_{a1a4}^{(y)}) \cos(\alpha - \theta) = \\
 & = (1 - \nu_{a1a2}) r_{a2a3} \cos(\alpha - \theta) + (1 - \nu_{a1a4}) r_{a3a4} \cos(\alpha - \theta), \quad (2.115)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & P_{i,j} \cos \beta_{i,j} + (R_{a1a2}^{(0)} - R_{a1a4}^{(y)}) \sin(\alpha - \theta) = \\
 & = -(1 + \nu_{a1a2}) r_{a2a3} \sin(\alpha - \theta) + (1 + \nu_{a1a4}) r_{a3a4} \sin(\alpha - \theta), \quad (2.116)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & P_{i,j} \cos \beta_{i,j} - R_{a2a3}^{(y)} \cos(\alpha_{11} - \theta_{11}) - R_{a3a4}^{(0)} \cos(\alpha_{11} - \theta_{11}) = \\
 & = r_{a2a3} \cos(\alpha - \theta) + r_{a3a4} \cos(\alpha - \theta), \quad (2.117)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & P_{i,j} \cos \beta_{i,j} + R_{a2a3}^{(y)} \sin(\alpha_{11} - \theta_{11}) - R_{a3a4}^{(0)} \sin(\alpha_{11} - \theta_{11}) = \\
 & = r_{a2a3} \sin(\alpha - \theta) - r_{a3a4} \sin(\alpha - \theta). \quad (2.118)
 \end{aligned}$$

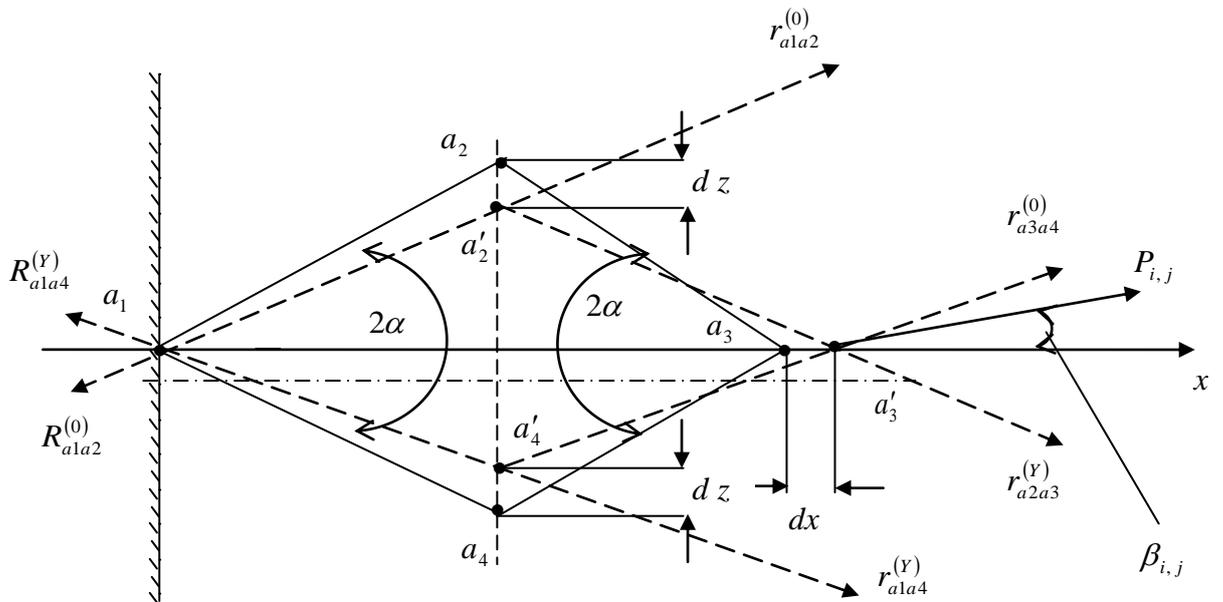


Рис.2.25. Схема действия внешней силы  $P_{i,j}$  под углом  $\beta_{i,j}$  к горизонтальной оси  $x$

Для более детального анализа законов распределения натяжения и деформации вдоль нитей основы и уточным нитям, рассмотрим изображенной на рис.2.27 способ нагружения образца ткани. В плоскости  $(x, z)$  нити основы  $(1,5-5,1)$ ,  $(2,5-5,2)$ ,  $(3,5-5,3)$ ,  $(4,5-5,4)$ ,  $(5,5-7,3)$ ,  $(6,5)$ ,  $(7,5-8,4)$ ,  $(8,5)$ ,  $(9,5)$  и уточные нити  $(5,1)$ ,  $(5,2)$ ,  $(5,3-2,4)$ ,  $(5,4)$ ,  $(5,5-3,3)$ ,  $(5,6-5,4)$ ,  $(5,7-4,2)$ ,  $(5,8-5,2)$ ,  $(5,9-5,1)$  описываются следующими линейными уравнениями соответственно:

– НИТИ ОСНОВЫ

$$z_{1,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{1,5} - l_{1,5}, \quad z_{2,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{2,5} - l_{2,5}, \quad z_{3,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{3,5} - l_{3,5}, \quad z_{4,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{4,5} - l_{4,5}, \quad z_{5,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{5,5},$$

$$z_{6,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{6,5} + l_{6,5}, \quad z_{7,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{7,5} + l_{7,5}, \quad z_{8,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{8,5} + l_{8,5},$$

$$z_{9,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{9,5} + l_{9,5}; \quad (2.119)$$

– УТОЧНЫЕ НИТИ

$$z_{5,1} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,1} - l_{5,1}, \quad z_{5,2} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,2} - l_{5,2}, \quad z_{5,3} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,3} - l_{5,3}, \quad z_{5,4} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,4} - l_{5,4},$$

$$z_{5,5} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,5}, \quad z_{5,6} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,6} + l_{5,6}, \quad z_{5,7} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,7} + l_{5,7}, \quad z_{5,8} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,8} + l_{5,8},$$

$$z_{5,9} = -x \operatorname{tg} \alpha_{5,9} + l_{5,9}, \quad (2.120)$$

где  $\alpha_{i,j}$  и  $\alpha_{j,i}$  – углы, образованные пересечением нитей основы и уточной нити;  $\operatorname{tg} \alpha_{i,j}$  и  $\operatorname{tg} \alpha_{j,i}$  – угловые коэффициенты прямых, лежащих в плоскости  $(x, z)$ ;  $l_{i,j}$  – расстояния от начала координат до точки пересечения  $i, j$  – ой нити основы с

осью  $x=0$ ;  $l_{j,i}$  – расстояния от начала координат до точки пересечения  $j,i$  – ой уточной нити с осью  $x=0$ .

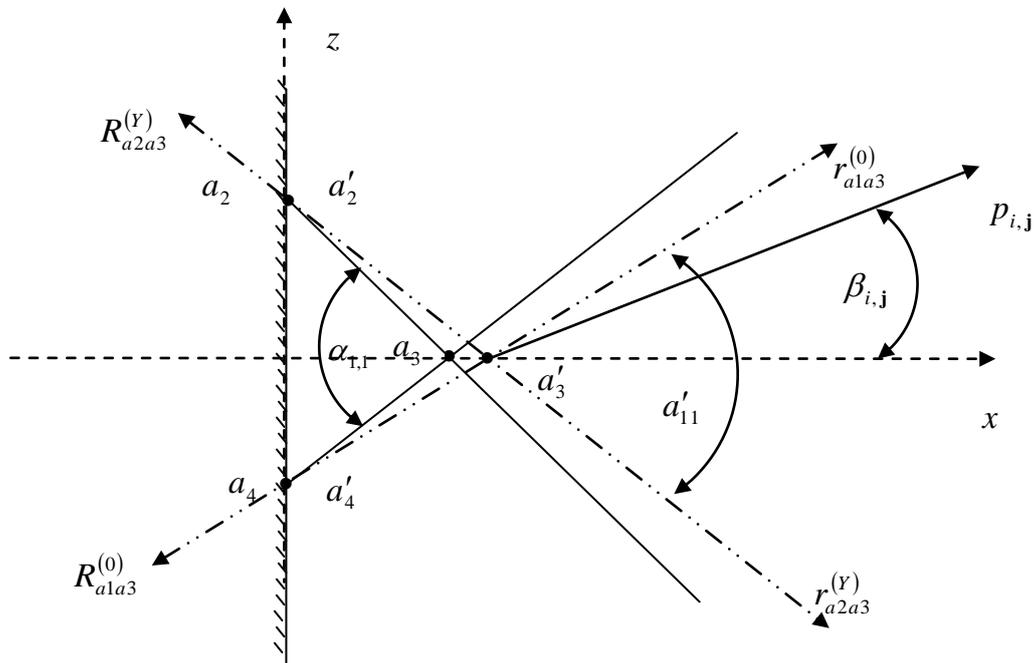


Рис.2.26. Схема образования внешней силы  $P_{i,j}$  заданного угла  $\beta_{i,j}$

Предположим, что все ячейки, образованные переплетением нитей основы и уточных нитей, первоначально имеют форму квадратиков со сторонами, равными по величине  $l$ . Тогда  $\alpha_{i,j} = \alpha_{j,i} = 45^\circ$ ,  $\text{tg} \alpha_{i,j} = \text{tg} \alpha_{j,i} = 1$ ,  $l_{1,5} = 4l$ ,  $l_{2,5} = 3l$ ,  $l_{3,5} = 2l$ ,  $l_{4,5} = l$ ,  $l_{6,5} = l$ ,  $l_{7,5} = 2l$ ,  $l_{8,5} = 3l$ ,  $l_{9,5} = 4l$ , и уравнения (2.119), (2.120) принимают следующий вид:

– НИТИ ОСНОВЫ

$$\begin{aligned} z_{1,5} = x - 4l, \quad z_{2,5} = x - 3l, \quad z_{3,5} = x - 2l, \quad z_{4,5} = x - l, \quad z_{5,5} = x, \quad z_{6,5} = x + l, \\ z_{7,5} = x + 2l, \quad z_{8,5} = x + 3l, \quad z_{9,5} = x + 4l; \end{aligned} \quad (2.121)$$

– УТОЧНЫЕ НИТИ

$$\begin{aligned} z_{5,1} = -x - 4l, \quad z_{5,2} = -x - 3l, \quad z_{5,3} = -x - 2l, \quad z_{5,4} = -x - l, \quad z_{5,5} = -x, \quad z_{5,6} = -x + l, \\ z_{5,7} = -x + 2l, \quad z_{5,8} = -x + 3l, \quad z_{5,9} = -x + 4l. \end{aligned} \quad (2.122)$$

Уравнения прямых, проходящих через узловые точки (диагоналей) квадратных ячеек, принимают вид:

– горизонтальные

$$\begin{aligned} z &= 0 \quad (\text{диагональ (5.5)–(5.1)}), \\ z &= \sqrt{2}l \quad (\text{диагональ (6.5)–(6.2)}), \\ z &= 2\sqrt{2}l \quad (\text{диагональ (7.5)–(7.3)}), \\ z &= 3\sqrt{2}l \quad (\text{диагональ (8.5)–(8.4)}); \end{aligned}$$

– вертикальные

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{2}l \quad (\text{диагональ (2.4)–(8.4)}), \\ x &= 2\sqrt{2}l \quad (\text{диагональ (3.3)–(7.3)}), \\ x &= 3\sqrt{2}l \quad (\text{диагональ (4.2)–(4.6)}). \end{aligned}$$

Если все нити в рассматриваемой ткани равноправны, то натяжения и деформации нитей (5.9)–(5.1) и (1.5)–(5.1) равны соответственно:

– натяжения

$$r_{5,9} = -R_{5,9} = P_{i,j} \cos(\alpha_{5,9} - \theta_{5,9}), \quad r_{1,5} = -R_{1,5} = P_{i,j} \cos(\alpha_{5,9} - \theta_{5,9}); \quad (2.123)$$

– абсолютные удлинения

$$\Delta l_{5,9} = \sum_{j=1}^8 \Delta l_{j,5} = 8\Delta l_{j,5} = \frac{8N_{j,5}l_{j,5}}{E_{j,5}F_{j,5}}, \quad \Delta l_{1,5} = \sum_{j=1}^8 \Delta l_{j,1} = 8\Delta l_{j,1} = \frac{8N_{j,1}l_{j,1}}{E_{j,1}F_{j,1}}; \quad (2.124)$$

– относительные удлинения

$$\varepsilon_{5,9} = \frac{\sigma_{5,9}}{F_{5,9}}, \quad \varepsilon_{1,5} = \frac{\sigma_{1,5}}{F_{1,5}}. \quad (2.125)$$

Перемещение точки (5.5) равно нулю, а точки (5.1):

– в горизонтальном направлении

$$\delta_{5,1}^{(GOP)} = \sum_{j=1}^5 \Delta l_{5,j}^{(GOP)} = \sum_{j=1}^5 \Delta l_{5,j} \cos(\alpha_{5,j} - \theta_{5,j}); \quad (2.126)$$

– в вертикальном направлении

$$\delta_{5,1}^{(BEP)} = \sum_{j=1}^5 \Delta l_{5,j}^{(BEP)} = \sum_{j=1}^5 \Delta l_{5,j} \sin(\alpha_{5,j} - \theta_{5,j}). \quad (2.127)$$

Следует отметить, что полное перемещение точки (5.1) в вертикальном направлении равно нулю.

Для качественного и количественного анализа зависимости перемещения различных точек образца ткани в вертикальном и горизонтальном направлениях от величины и направления силы растяжения  $P_{i,j}$ , проводились численно-экспериментальные исследования. Предполагается, что первоначально все ячейки образца ткани имеют формы квадрата со сторонами  $l_{i,j}$ . Схема нагружения рассматриваемого образца ткани внешней силой  $P_{i,j} = \sum_{i,j}^p p_{i,j}$  под углом  $\beta_{i,j}$  к направлениям диагоналей ячеек, т.е. по узловым точкам 1–9 и 1'–9', приведена на рис. 2.28. Точки 9 и 9' совпадают, расположены в одном узле и поэтому на рис. 2.28 данная точка не приводится.

Если обозначить через  $P_{i,j}^{(ГОР)}$ ,  $P_{i,j}^{(ВЕР)}$  и  $p_{i,j}^{(ГОР)}$ ,  $p_{i,j}^{(ВЕР)}$  горизонтальные и вертикальные составляющие внешних сил  $P_{i,j}$  и  $p_{i,j}$  соответственно, то

$$P_{i,j}^{(ГОР)} = P_{i,j} \cos \beta_{ij}, \quad P_{i,j}^{(ВЕР)} = P_{i,j} \sin \beta_{ij}.$$

На рис.2.29 – 2.32 приведены результаты проведенных численно-экспериментальных исследований перемещения точек 1–1', 2–2', 3–3', 4–4', 5–5', 6–6', 7–7', 8–8', 9–9' (рис.2.16) в горизонтальном (рис.2.29 и 2.31) и вертикальном (рис.2.30 и 2.32) направлениях, полученные при  $l_{i,j} = 1\text{мм}$ ,  $EF = 100\text{сН}$ ,  $P_{i,j} = 20\text{сН}$  (рис.2.29 – 2.30) и  $l_{i,j} = 1\text{мм}$ ,  $EF = 100\text{сН}$ ,  $P_{i,j} = 40\text{сН}$  (рис.2.31 – 2.32).

При проведении численно-экспериментальных исследований, результаты которых приведены на рис.2.29 и 2.30 предполагается, что если общая сила  $P_{i,j}$  нагружения по величине равна  $P_{i,j} = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} = 20 \cdot 18 = 360\text{сН}$  и прилагается симметрично относительно оси  $x$ , то в областях, расположенных выше и ниже горизонтальной оси  $x$ , т.е. в областях  $z > 0$  и  $z < 0$ , силы растяжения принимают следующие значения соответственно

$$P_{i,j}(z > 0) = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} = 20 \cdot 9 = 180\text{сН},$$

$$P_{i,j}(z < 0) = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} = 20 \cdot 9 = 180 \text{ cH} .$$

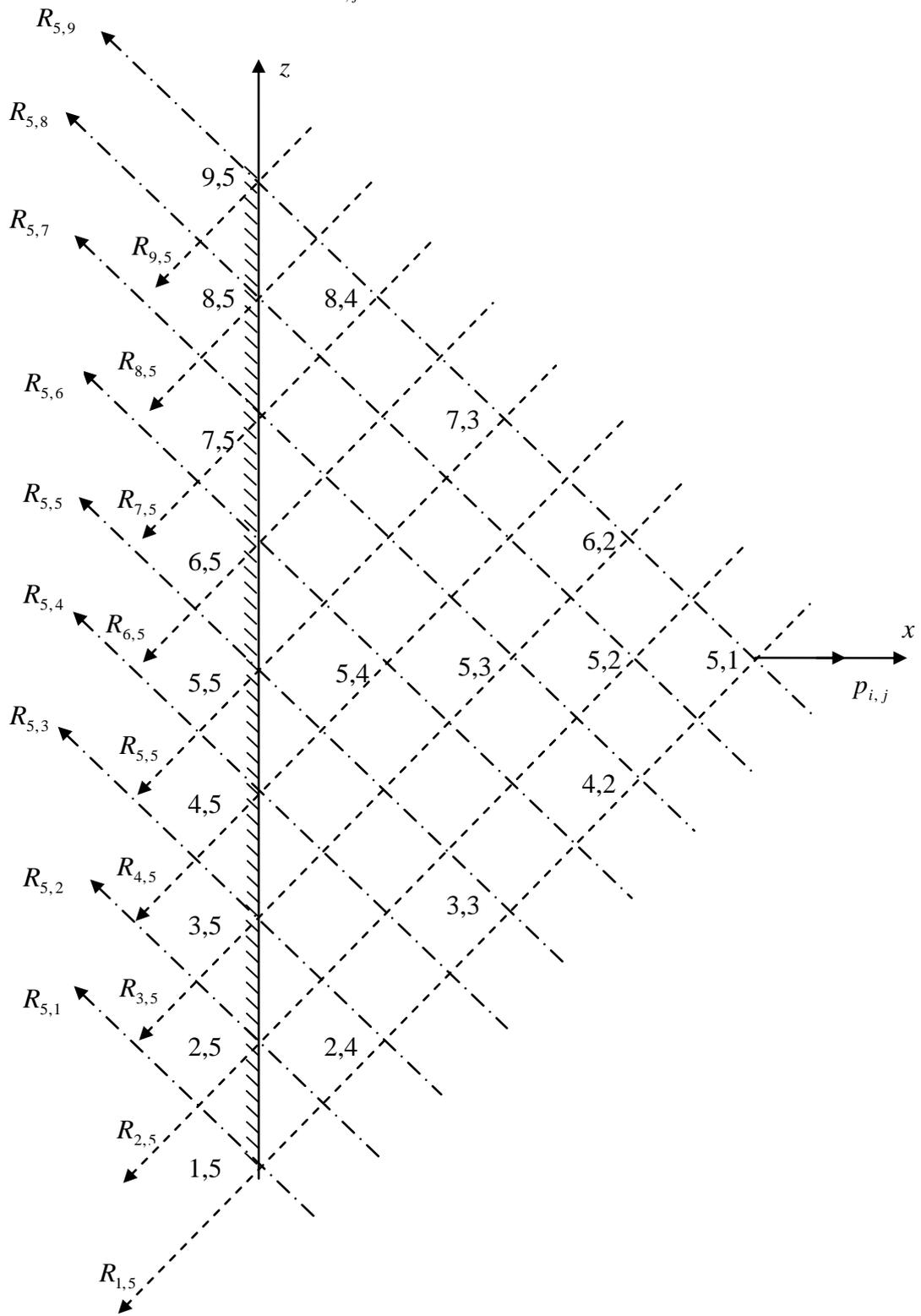


Рис.2.27. Схема распределения деформации вдоль нитей основы и уточных нитей:----- - нити основы; - - - - - уточные нити

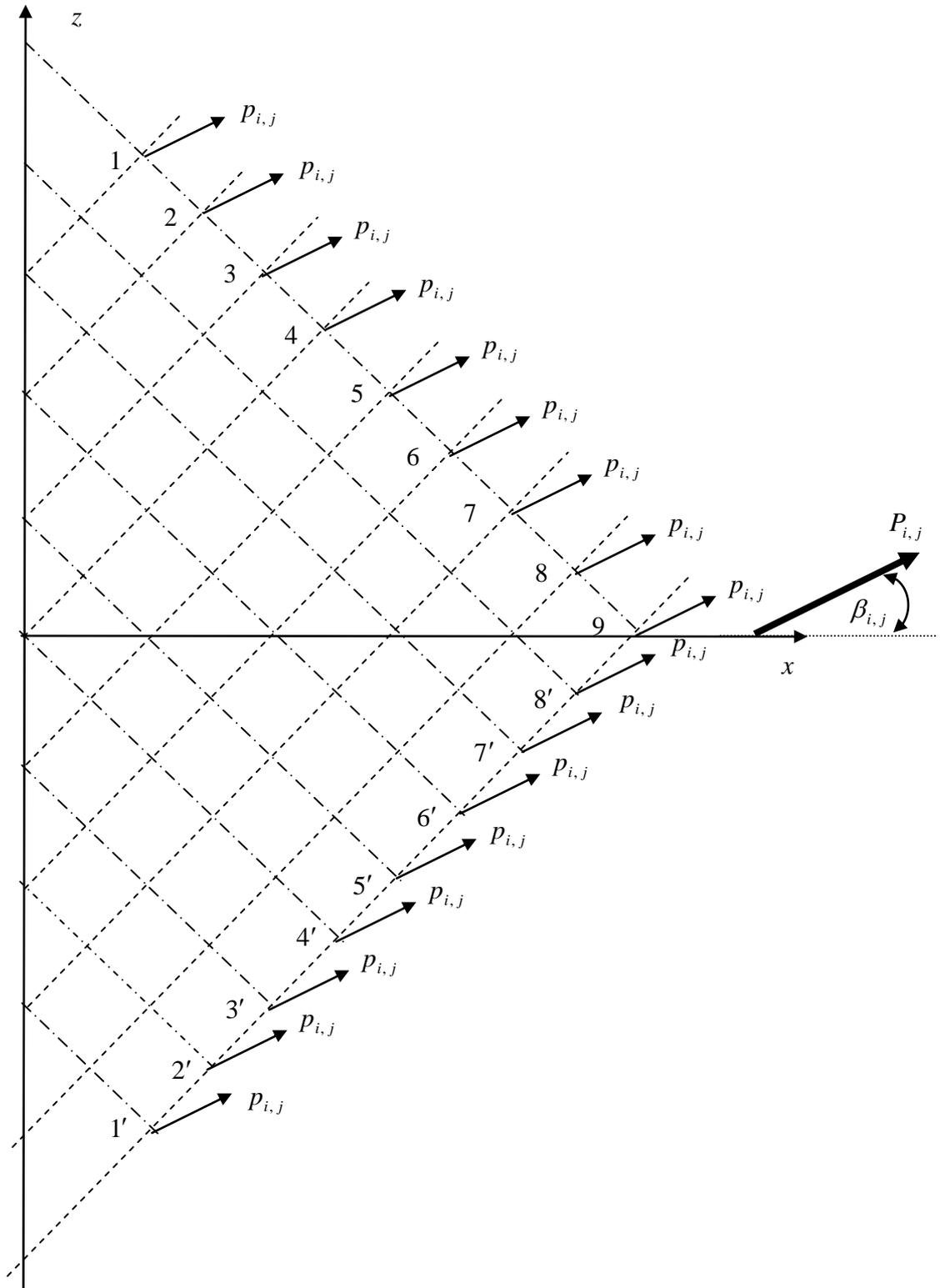


Рис.2.28. Схема расчета зависимости направления перемещения узловых точек образца ткани от вектора силы растяжения

Составляющие этих сил на горизонтальной и вертикальной оси будут

$$P_{i,j}^{(GOP)}(z > 0) = \sum_{i,j}^9 P_{i,j}^{(GOP)} = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} \cos \beta_{i,j} = 180 \cos \beta_{i,j},$$

$$P_{i,j}^{(BEP)}(z < 0) = \sum_{i,j}^9 P_{i,j}^{(BEP)} = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} \sin \beta_{i,j} = 180 \sin \beta_{i,j}.$$

На рис.2.31 и 2.32 приняты следующие исходные данные:

– общее значение силы растяжения  $P_{i,j}$  вдоль направления нагружения

$$P_{i,j} = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} = 40 \cdot 18 = 720 \text{ cH};$$

– общие значения силы растяжения в областях  $z > 0$  и  $z < 0$

$$P_{i,j}(z > 0) = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} = 40 \cdot 9 = 360 \text{ cH},$$

$$P_{i,j}(z < 0) = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} = 40 \cdot 9 = 360 \text{ cH};$$

– составляющие силы растяжения на горизонтальной и вертикальной оси

$$P_{i,j}^{(GOP)}(z > 0) = \sum_{i,j}^9 P_{i,j}^{(GOP)} = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} \cos \beta_{i,j} = 360 \cos \beta_{i,j},$$

$$P_{i,j}^{(BEP)}(z < 0) = \sum_{i,j}^9 P_{i,j}^{(BEP)} = \sum_{i,j}^9 p_{i,j} \sin \beta_{i,j} = 360 \sin \beta_{i,j}.$$

При  $\beta_{i,j} = 0$  силы  $p_{i,j}$  (или равнодействующие  $P_{i,j}$ ) действуют в горизонтальном направлении. В этом случае, рассматриваемые узловые точки перемещаются только в горизонтальном направлении, т.е. перемещения в вертикальном направлении отсутствуют. Этому случаю соответствуют первые строки анализируемых таблиц. Первые строки таблиц 2.1 и 2.3 соответствуют перемещениям в горизонтальном направлении при  $\beta_{i,j} = 0$  и значении внешней силы  $p_{i,j} = 20 \text{ cH}$  и  $p_{i,j} = 40 \text{ cH}$  соответственно, а таблиц 2.2 и 2.4 – перемещениям в вертикальном направлении при тех же значениях угла  $\beta_{i,j}$  и внешней силы  $p_{i,j}$ .

Из общего анализа рассматриваемых рисунков следуют следующие выводы:

1. При увеличении силы  $p_{i,j}$  перемещения всех точек 1–9 и 1'–9' образца ткани возрастают, т.е. узловые точки 1 и 1' получают минимальные, а узловые точки 9 и 9' – максимальные перемещения. Например, при  $p_{i,j} = 20 \text{ сН}$  (табл. 2.1) узловая точка 1 в горизонтальном направлении перемещается на расстояние  $\delta_{1,j} = 0,02 \text{ мм}$ , точка 9 – на расстояние  $\delta_{9,j} = 0,18 \text{ мм}$ , а при  $p_{i,j} = 40 \text{ сН}$  (табл. 2.3) – на расстояния  $\delta_{1,j} = 0,04 \text{ мм}$  и  $\delta_{9,j} = 0,36 \text{ мм}$  соответственно. Это объясняется, тем, что согласно приведенным выше формулам, перемещение точек 1–9 и 1'–9' определяются по формулам:

– точки 1 и 1'

$$\delta_{1,j}^{(GOP)} = \Delta l_{1,j}^{(GOP)} = \Delta l_{1,j} \cos \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(GOP)} \Delta l_{1,j}^{(GOP)}}{EF},$$

$$\delta_{1,j}^{(GOP)'} = \Delta l_{1,j}^{(GOP)'} = \Delta l_{1,j}' \cos \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(GOP)} \Delta l_{1,j}^{(GOP)'}}{EF},$$

$$\delta_{1,j}^{(BEP)} = \Delta l_{1,j}^{(BEP)} = \Delta l_{1,j} \sin \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(BEP)} \Delta l_{1,j}^{(BEP)}}{EF},$$

$$\delta_{1,j}^{(BEP)'} = \Delta l_{1,j}^{(BEP)'} = \Delta l_{1,j}' \sin \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(BEP)} \Delta l_{1,j}^{(BEP)'}}{EF};$$

– точки 2 и 2'

$$\delta_{2,j}^{(GOP)} = \Delta l_{1,j}^{(GOP)} + \Delta l_{2,j}^{(GOP)} = (\Delta l_{1,j} + \Delta l_{2,j}) \cos \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(GOP)}}{EF} (\Delta l_{1,j}^{(GOP)} + \Delta l_{2,j}^{(GOP)}),$$

$$\delta_{2,j}^{(GOP)'} = \Delta l_{1,j}^{(GOP)'} + \Delta l_{2,j}^{(GOP)'} = (\Delta l_{1,j}' + \Delta l_{2,j}') \cos \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(GOP)}}{EF} (\Delta l_{1,j}^{(GOP)'} + \Delta l_{2,j}^{(GOP)'}),$$

$$\delta_{2,j}^{(BEP)} = \Delta l_{1,j}^{(BEP)} + \Delta l_{2,j}^{(BEP)} = (\Delta l_{1,j} + \Delta l_{2,j}) \sin \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(BEP)}}{EF} (\Delta l_{1,j}^{(BEP)} + \Delta l_{2,j}^{(BEP)}),$$

$$\delta_{2,j}^{(BEP)'} = \Delta l_{1,j}^{(BEP)'} + \Delta l_{2,j}^{(BEP)'} = (\Delta l_{1,j}' + \Delta l_{2,j}') \sin \beta_{i,j} = \frac{p_{i,j}^{(BEP)}}{EF} (\Delta l_{1,j}^{(BEP)'} + \Delta l_{2,j}^{(BEP)'});$$

– точки 3 и 3'

$$\delta_{3,j}^{(GOP)} = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j}^{(GOP)}) = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j} \cos \beta_{i,j}) = \frac{p_{i,j}^{(GOP)}}{EF} \sum_{i=1}^3 \Delta l_{i,j}^{(GOP)},$$

$$\delta_{3,j}^{(GOP)'} = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j}^{(GOP)'}) = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j}' \cos \beta_{i,j}) = \frac{p_{i,j}^{(GOP)}}{EF} \sum_{i=1}^3 \Delta l_{i,j}^{(GOP)'},$$

$$\delta_{3,j}^{(BEP)} = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j}^{(BEP)}) = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j} \sin \beta_{i,j}) = \frac{P_{i,j}^{(BEP)}}{EF} \sum_{i=1}^3 \Delta l_{i,j}^{(BEP)},$$

$$\delta_{3,j}^{(BEP)'} = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j}^{(BEP)'}) = \sum_{i=1}^3 (\Delta l_{i,j}' \sin \beta_{i,j}) = \frac{P_{i,j}^{(BEP)'}}{EF} \sum_{i=1}^3 \Delta l_{i,j}^{(BEP)'};$$

и т.д.

– точки 9 и 9'

$$\delta_{9,j}^{(GOP)} = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j}^{(GOP)}) = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j} \cos \beta_{i,j}) = \frac{P_{i,j}^{(GOP)}}{EF} \sum_{i=1}^9 \Delta l_{i,j}^{(GOP)},$$

$$\delta_{9,j}^{(GOP)'} = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j}^{(GOP)'}) = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j}' \cos \beta_{i,j}) = \frac{P_{i,j}^{(GOP)'}}{EF} \sum_{i=1}^9 \Delta l_{i,j}^{(GOP)'},$$

$$\delta_{9,j}^{(BEP)} = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j}^{(BEP)}) = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j} \sin \beta_{i,j}) = \frac{P_{i,j}^{(BEP)}}{EF} \sum_{i=1}^9 \Delta l_{i,j}^{(BEP)},$$

$$\delta_{9,j}^{(BEP)'} = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j}^{(BEP)'}) = \sum_{i=1}^9 (\Delta l_{i,j}' \sin \beta_{i,j}) = \frac{P_{i,j}^{(BEP)'}}{EF} \sum_{i=1}^9 \Delta l_{i,j}^{(BEP)'}$$

Если рассматриваемый образец ткани однородный, т.е. если все нити равноправны и внешняя нагрузка направлена симметрично относительно системы координат  $(x, z)$ , то последние соотношения принимают вид:

– точки 1 и 1'

$$\delta_{1,j}^{(GOP)} = \delta_{1,j}^{(GOP)'} = \Delta l_{1,j} \cos \beta_{i,j} = \frac{P_{i,j}^{(GOP)} \Delta l_{1,j}^{(GOP)}}{EF},$$

$$\delta_{1,j}^{(BEP)} = \delta_{1,j}^{(BEP)'} = \Delta l_{1,j} \sin \beta_{i,j} = \frac{P_{i,j}^{(BEP)} \Delta l_{1,j}^{(BEP)}}{EF};$$

– точки 2 и 2'

$$\delta_{2,j}^{(GOP)} = \delta_{2,j}^{(GOP)'} = 2\Delta l_{1,j}^{(GOP)} = 2\Delta l_{1,j} \cos \beta_{i,j} = \frac{2P_{i,j}^{(GOP)} \Delta l_{1,j}^{(GOP)}}{EF},$$

$$\delta_{2,j}^{(BEP)} = \delta_{2,j}^{(BEP)'} = 2\Delta l_{1,j}^{(BEP)} = 2\Delta l_{1,j} \sin \beta_{i,j} = \frac{2P_{i,j}^{(BEP)} \Delta l_{1,j}^{(BEP)}}{EF};$$

– точки 3 и 3'

$$\delta_{3,j}^{(GOP)} = \delta_{3,j}^{(GOP)'} = 3\Delta l_{1,j}^{(GOP)} = 3\Delta l_{1,j} \cos \beta_{i,j} = \frac{3P_{i,j}^{(GOP)} \Delta l_{1,j}^{(GOP)}}{EF},$$

$$\delta_{3,j}^{(BEP)} = \delta_{3,j}^{(BEP)'} = 3\Delta l_{1,j}^{(BEP)} = 3\Delta l_{1,j} \sin \beta_{i,j} = \frac{3P_{i,j}^{(BEP)} \Delta l_{1,j}^{(BEP)}}{EF};$$

и т.д.

– точки 9 и 9'

$$\delta_{9,j}^{(GOP)} = \delta_{9,j}^{(GOP)'} = 9\Delta l_{1,j}^{(GOP)} = 9\Delta l_{1,j} \cos \beta_{i,j} = \frac{9p_{i,j}^{(GOP)} \Delta l_{1,j}^{(GOP)}}{EF},$$

$$\delta_{9,j}^{(BEP)} = \delta_{9,j}^{(BEP)'} = 9\Delta l_{1,j}^{(BEP)} = 9\Delta l_{1,j} \sin \beta_{i,j} = \frac{9p_{i,j}^{(BEP)} \Delta l_{1,j}^{(BEP)}}{EF}.$$

При  $p_{i,j} = 20 \text{ cH}$ ,  $\beta_{i,j} = 15^\circ$  составляющие перемещения точки 9 принимают значения

$$\delta_{9,j}^{(GOP)} = 0,1738 \text{ мм (табл.2.1)}, \delta_{9,j}^{(BEP)} = 0,0465 \text{ мм (табл.2.2)},$$

а при  $p_{i,j} = 20 \text{ cH}$ ,  $\beta_{i,j} = 15^\circ$  – принимают значения

$$\delta_{9,j}^{(GOP)} = 0,3477 \text{ мм (табл.2.3)}, \delta_{9,j}^{(BEP)} = 0,0931 \text{ мм (табл.2.4)}.$$

Возрастание горизонтальных составляющих равняется

$$\Delta \delta_{9,j}^{(GOP)} = \delta_{9,j}^{(GOP)}(40) - \delta_{9,j}^{(GOP)}(20) = 0,3477 - 0,1738 = 0,1739 \text{ cH},$$

а вертикальных составляющих –

$$\Delta \delta_{9,j}^{(BEP)} = \delta_{9,j}^{(BEP)}(40) - \delta_{9,j}^{(BEP)}(20) = 0,0931 - 0,0465 = 0,0466 \text{ cH}.$$

2. При движении по узловым точкам 1 – 9 абсолютные удлинения элементарных нитей остаются постоянными, а составляющие перемещения, которые равны сумме абсолютных перемещений элементарных нитей, возрастают. Например, при  $\beta_{i,j} = 15^\circ$  горизонтальные и вертикальные составляющие перемещения точки 1 равны

$$\delta_{1,j}^{(GOP)} = \Delta l_{1,j}^{(GOP)} = 0,0193 \text{ мм (табл.2.1)},$$

$$\delta_{1,j}^{(BEP)} = \Delta l_{1,j}^{(BEP)} = 0,0051 \text{ мм (табл.2.2)},$$

соответственно, а точки 9 –

$$\delta_{9,j}^{(GOP)} = \sum_{j=1}^9 \Delta l_{1,j}^{(GOP)} = 0,1738 \text{ мм (табл.2.1)},$$

$$\delta_{9,j}^{(BEP)} = \sum_{j=1}^9 \Delta l_{1,j}^{(BEP)} = 0,3477 \text{ мм (табл.2.2)}.$$

Таблица 2.1

Перемещения точек 1–1', 2–2', 3–3', 4–4', 5–5', 6–6', 7–7', 8–8', 9–9' в горизонтальном направлении,  
полученные при  $P_{i,j} = 20 \text{ cH}$ ,  $l_{i,j} = 1 \text{ мм}$ ,  $EF = 100 \text{ cH}$

| Угол $\alpha$ ,<br>град | Перемещения точек переплетения уточных нитей |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0                       | 0,0200                                       | 0,0400 | 0,0600 | 0,0800 | 0,1000 | 0,1200 | 0,1400 | 0,1600 | 0,1800 |
| 5                       | 0,0199                                       | 0,0398 | 0,0597 | 0,0796 | 0,0996 | 0,1195 | 0,1394 | 0,1593 | 0,1793 |
| 10                      | 0,0196                                       | 0,0393 | 0,0590 | 0,0787 | 0,0984 | 0,1181 | 0,1378 | 0,1575 | 0,1772 |
| 15                      | 0,0193                                       | 0,0386 | 0,0579 | 0,0772 | 0,0965 | 0,1159 | 0,1352 | 0,1545 | 0,1738 |
| 20                      | 0,0187                                       | 0,0375 | 0,0563 | 0,0751 | 0,0939 | 0,1127 | 0,1315 | 0,1503 | 0,1691 |
| 25                      | 0,0181                                       | 0,0362 | 0,0543 | 0,0725 | 0,0906 | 0,1087 | 0,1268 | 0,1450 | 0,1631 |
| 30                      | 0,0173                                       | 0,0346 | 0,0519 | 0,0692 | 0,0866 | 0,1039 | 0,1212 | 0,1385 | 0,1559 |
| 35                      | 0,0163                                       | 0,0327 | 0,0491 | 0,0655 | 0,0819 | 0,0983 | 0,1147 | 0,1310 | 0,1474 |
| 40                      | 0,0153                                       | 0,0306 | 0,0459 | 0,0613 | 0,0766 | 0,0919 | 0,1072 | 0,1226 | 0,1397 |
| 45                      | 0,0141                                       | 0,0282 | 0,0424 | 0,0565 | 0,0707 | 0,0848 | 0,0990 | 0,1131 | 0,1273 |

**Таблица 2.2**

Перемещения точек 1–1', 2–2', 3–3', 4–4', 5–5', 6–6', 7–7', 8–8', 9–9' в вертикальном направлении,  
полученные при  $P_{i,j} = 20 \text{ сН}$ ,  $l_{i,j} = 1 \text{ мм}$ ,  $EF = 100 \text{ сН}$

| Угол $\alpha$ ,<br>град | Перемещения точек переплетения уточных нитей |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0                       | 0,0000                                       | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5                       | 0,0017                                       | 0,0034 | 0,0052 | 0,0069 | 0,0087 | 0,0104 | 0,0121 | 0,0139 | 0,0156 |
| 10                      | 0,0034                                       | 0,0069 | 0,0104 | 0,0138 | 0,0173 | 0,0208 | 0,0242 | 0,0277 | 0,0312 |
| 15                      | 0,0051                                       | 0,0103 | 0,0155 | 0,0206 | 0,0258 | 0,0310 | 0,0362 | 0,0413 | 0,0465 |
| 20                      | 0,0068                                       | 0,0136 | 0,0205 | 0,0273 | 0,0341 | 0,0410 | 0,0478 | 0,0546 | 0,0615 |
| 25                      | 0,0084                                       | 0,0168 | 0,0253 | 0,0337 | 0,0422 | 0,0506 | 0,0591 | 0,0675 | 0,0760 |
| 30                      | 0,0099                                       | 0,199  | 0,0299 | 0,0399 | 0,0499 | 0,0599 | 0,0699 | 0,0799 | 0,0899 |
| 35                      | 0,0114                                       | 0,0299 | 0,0343 | 0,0458 | 0,0573 | 0,0687 | 0,0820 | 0,0917 | 0,1031 |
| 40                      | 0,0128                                       | 0,0257 | 0,0385 | 0,0514 | 0,0642 | 0,0771 | 0,0899 | 0,1028 | 0,1156 |
| 45                      | 0,0141                                       | 0,0282 | 0,0424 | 0,0565 | 0,0706 | 0,0848 | 0,0989 | 0,1130 | 0,1272 |

**Таблица 2.3**

Перемещения точек 1–1', 2–2', 3–3', 4–4', 5–5', 6–6', 7–7', 8–8', 9–9' в горизонтальном направлении,  
полученные при  $P_{i,j} = 40 \text{ cH}$ ,  $l_{i,j} = 1 \text{ мм}$ ,  $EF = 100 \text{ cH}$

| Угол $\alpha$ ,<br>град | Перемещения точек переплетения уточных нитей |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0                       | 0,0400                                       | 0,0800 | 0,1200 | 0,1600 | 0,2000 | 0,2400 | 0,2800 | 0,3200 | 0,3600 |
| 5                       | 0,0398                                       | 0,0796 | 0,1195 | 0,1593 | 0,1992 | 0,2390 | 0,2789 | 0,3187 | 0,3586 |
| 10                      | 0,0393                                       | 0,0787 | 0,1181 | 0,1575 | 0,1969 | 0,2363 | 0,2757 | 0,3151 | 0,3545 |
| 15                      | 0,0386                                       | 0,0772 | 0,1159 | 0,1545 | 0,1931 | 0,2318 | 0,2704 | 0,3091 | 0,3477 |
| 20                      | 0,0375                                       | 0,0751 | 0,1127 | 0,1503 | 0,1879 | 0,2255 | 0,2631 | 0,3007 | 0,3383 |
| 25                      | 0,0362                                       | 0,0725 | 0,1087 | 0,1450 | 0,1812 | 0,2175 | 0,2537 | 0,2900 | 0,3263 |
| 30                      | 0,0346                                       | 0,0692 | 0,1039 | 0,1358 | 0,1732 | 0,2078 | 0,2425 | 0,2771 | 0,3118 |
| 35                      | 0,0327                                       | 0,0655 | 0,0983 | 0,1310 | 0,1638 | 0,1966 | 0,2294 | 0,2621 | 0,2949 |
| 40                      | 0,0306                                       | 0,0613 | 0,0919 | 0,1226 | 0,1532 | 0,1839 | 0,2145 | 0,2452 | 0,2758 |
| 45                      | 0,0282                                       | 0,0565 | 0,0848 | 0,1131 | 0,1414 | 0,1697 | 0,1980 | 0,2263 | 0,2546 |

Таблица 2.4

Перемещения точек 1–1', 2–2', 3–3', 4–4', 5–5', 6–6', 7–7', 8–8', 9–9' в горизонтальном направлении,  
полученные при  $P_{i,j} = 20 \text{ cH}$ ,  $l_{i,j} = 1 \text{ мм}$ ,  $EF = 100 \text{ cH}$

| Угол $\alpha$ ,<br>град | Перемещения точек переплетения уточных нитей |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0                       | 0,0000                                       | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5                       | 0,0034                                       | 0,0069 | 0,0104 | 0,0139 | 0,0174 | 0,0209 | 0,0243 | 0,0278 | 0,0313 |
| 10                      | 0,0069                                       | 0,0138 | 0,0208 | 0,0277 | 0,0347 | 0,0416 | 0,0485 | 0,0555 | 0,0621 |
| 15                      | 0,0103                                       | 0,0206 | 0,0310 | 0,0413 | 0,0517 | 0,0620 | 0,0724 | 0,0827 | 0,0931 |
| 20                      | 0,0136                                       | 0,0273 | 0,0410 | 0,0546 | 0,0683 | 0,0820 | 0,0957 | 0,1093 | 0,1230 |
| 25                      | 0,0168                                       | 0,0337 | 0,0506 | 0,0675 | 0,0844 | 0,1013 | 0,1182 | 0,1351 | 0,1520 |
| 30                      | 0,0199                                       | 0,0399 | 0,0599 | 0,0799 | 0,0999 | 0,1199 | 0,1399 | 0,1599 | 0,1799 |
| 35                      | 0,0200                                       | 0,0401 | 0,0601 | 0,0802 | 0,1003 | 0,1203 | 0,1404 | 0,1605 | 0,1805 |
| 40                      | 0,0244                                       | 0,0449 | 0,0674 | 0,0899 | 0,1124 | 0,1349 | 0,1574 | 0,1799 | 0,2023 |
| 45                      | 0,0247                                       | 0,0494 | 0,0742 | 0,0989 | 0,1236 | 0,1484 | 0,1731 | 0,1979 | 0,2226 |

