

На правах рукописи

Зинякин Роман Сергеевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА И ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СЛЕПОЧНЫХ ЛОЖЕК ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ**

Специальность: 05.11.17 – Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Тверском государственном техническом университете.

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Филатова Наталья Николаевна

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Бегун Петр Иосифович
кандидат технических наук, доцент Биллиг Владимир Арнольдович

Ведущая организация – Рязанский государственный радиотехнический университет

Защита диссертации состоится “15” декабря 2010 г. в 14 часов
на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.238.09 Санкт-Петербургского государственного электротехнического
университета “ЛЭТИ” имени В. И. Ульянова (Ленина) по адресу:
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5652.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “____” ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

Болсунов К.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается повсеместное увеличение продолжительности жизни, при этом возрастает количество людей старших возрастных групп (возраст более 60 лет). Процесс старения приводит к необратимой утрате отдельных функций организма, сопровождается потерей зубов. По оценкам ВОЗ распространенность полной вторичной адентии среди населения в возрастной группе от 65 до 74 лет в разных странах варьируется от 6 до 72 %.

Полная потеря зубов нарушает акт жевания, пищеварительный процесс, функцию речи (ухудшается дикция), происходит изменение общих черт лица. Все это обуславливает необходимость восстановления зубного ряда.

Полную вторичную адентию лечат применением полных съемных протезов. Искусственные зубы устанавливаются на базис протеза. Его рабочая поверхность должна в максимальной степени соответствовать топологии протезного ложа, для обеспечения их ретенции (присасывания). Этот способ протезирования не имеет противопоказаний. Процедуру протезирования возможно проводить неоднократно. Стоимость изготовления полного съемного протеза, замещающего весь зубной ряд, в среднем, в 14 раз дешевле стоимости установки имплантата, замещающего один зуб. Протезирование полными съемными протезами челюстей с полной потерей зубного ряда является наиболее социально ориентированным способом лечения.

Изготовление базиса протеза начинают с получения анатомического оттиска беззубой челюсти. Точность оттиска определяет успех ортопедического лечения в целом и зависит от многих факторов (свойств оттискных масс, соответствия формы и размеров оттискной ложки и челюсти).

Существующие в настоящее время методики изготовления полных съемных протезов основаны на итерационной схеме последовательного приближения параметров оттиска к форме и размерам беззубой челюсти (примерка-припасовка протеза), что делает необходимым многократное посещение врача. Это увеличивает время работы специалиста и доставляет неудобства для людей старшей возрастной категории и пациентов, живущих вдали от стоматологических клиник.

Исследования, проведенные в нашей стране (Бошерницан И.Л., Ищенко Е.А.) и за рубежом (J. Kemeny, P. Маркскорс, I. Schreinemakers) в 60-х годах, позволили создать стандартные слепочные ложки (ССЛ), которые используются на практике в настоящее время. Однако, применение этих наборов даже в совокупности с оттискными массами с улучшенными свойствами не приводит к существенному сокращению числа итераций и увеличению точности первичного анатомического оттиска (Т. Веале, Ряховский А.Н.). Решение этих проблем необходимо искать в области усовершенствования анатомической формы рабочей поверхности ССЛ.

Учитывая, что современные информационные технологии позволяют по уравнениям математической модели рассчитывать точки, составляющие

сложные поверхности и управлять процессом изготовления физической модели появляется возможность создания новой методики построения полуиндивидуальных слепочных ложек.

В связи с этим возникает актуальная научная задача создания моделей полуиндивидуальных слепочных ложек и методик их построения и подбора.

Целью данной работы является повышение точности анатомического оттиска беззубых челюстей путем разработки их моделей, лингвистических описаний, алгоритмов, специальных инструментов и создания автоматизированной системы подбора, построения и изготовления слепочных ложек.

Для достижения поставленной цели определены **следующие задачи**:

1. Выполнить анализ технологии протезирования и разработать ее формальное описание.

2. Определить инструментально-методические средства для сбора исходных данных по геометрии беззубой челюсти человека.

3. Разработать параметрические модели верхней и нижней челюстей.

4. Разработать математическое описание базовых элементов каркасной модели челюсти.

5. Разработать алгоритмы подбора и построения стандартной слепочной ложки с учетом нечетких оценок формы челюсти.

6. Разработать архитектуру системы, фрагменты информационного, программного, технического обеспечений, провести экспериментальное исследование предложенных моделей и алгоритмов.

Объектом исследования являются слепочные ложки, применяемые для снятия анатомического оттиска с беззубых челюстей в процессе создания полных съемных протезов.

Предметом исследования являются методическое, алгоритмическое и техническое обеспечения для автоматизированного подбора и изготовления слепочных ложек для ортопедической стоматологии.

Методы исследования. В работе использовались методы математической статистики, системного анализа, теории нечетких множеств, методы кластерного анализа.

Новые научные результаты:

1. Предложена и обоснована структура параметрических моделей, учитывающих особенности строения и формы верхней и нижней беззубых челюстей, а также создана векторная модель, позволяющая выделять и количественно оценивать различия в форме альвеолярной дуги.

2. Создана математическая модель поверхности протезного ложа беззубой челюсти, включающая 12 уравнений, позволяющих по ограниченному числу базовых параметров рассчитывать координаты точек, составляющих рабочую поверхность оттискной ложки.

3. Разработан метод оценивания расстояния между лингвистическим описанием модели челюсти и лингвистическим описанием модели слепочной ложки, основанный на продукционных правилах, отражающих в лингвисти-

ческом базисе закономерности в сочетаниях базовых параметров челюсти человека.

4. Разработаны алгоритм выбора слепочной ложки на основе нечетких оценок компонентов параметрической модели челюсти, а также алгоритм определения параметров полуиндивидуальной оттисковой ложки для редких сочетаний форм, размеров челюстей и возможного проявления значительной асимметрии по ширине.

5. Разработана архитектура автоматизированной системы подбора и изготовления слепочных ложек.

Практическую ценность работы составляют:

1. Методика построения ряда моделей слепочных ложек с учетом свойств выборки, содержащей наиболее характерные примеры челюстей встречающихся в данном регионе.

2. Методика подбора слепочной ложки, основанная на алгоритме сравнении лингвистических описаний моделей челюсти человека и модели слепочной ложки;

3. Состав и функции основных компонентов автоматизированной системы выбора и изготовления слепочных ложек для ортопедической стоматологии, а также результаты их испытания.

4. Способ и устройство, позволяющее проводить измерения семи базовых параметров непосредственно на челюсти пациента.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в Тверской областной стоматологической поликлинике (г. Тверь); внедрены в стоматологической поликлинике Тверской государственной медицинской академии (г. Тверь).

Апробация результатов работы. Научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в 2007-2010 годах на НТК преподавателей и сотрудников ТГТУ, на III всероссийской научно-практической конференции «Научное творчество XXI века» (Красноярск, октябрь 2010), на IX международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки» (Таганрог, 6 сентября 2010).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Оценка расстояния между лингвистическими описаниями слепочной ложки и челюсти позволяет прогнозировать величину ошибки первичного анатомического оттиска.

2. Для построения индивидуальных моделей челюстей достаточно коррекции уравнений моделей поверхностей протезного ложа с помощью оценок ограниченного числа базовых параметров челюстей пациента.

3. Построение моделей протезного ложа беззубой челюсти в виде системы уравнений, описывающих элементарные фрагменты поверхностей, позволяет создавать модели слепочных ложек, учитывающих асимметрию, путем композиции из отдельных фрагментов.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 7 работах, среди которых 1 публикация в ведущих

рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, а также 4 статьи в других журналах и изданиях, 1 публикация в трудах международной научно-практической конференций, получено 1 авторское свидетельство на полезную модель устройства для измерения зубных или альвеолярных дуг.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 162 страницах машинописного текста, 84 рисунках, 36 таблицах, 7 приложениях. Список использованной литературы включает 104 наименований, среди которых 83 отечественных, 21 зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дается характеристика работы, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе диссертации введено допущение, что в качестве объекта исследований возможно использовать рабочие индивидуальные оттисковые ложки или функциональные гипсовые модели, так как они используются при создании базиса протеза и с высокой степенью достоверности учитывают анатомо-топографические особенности беззубых челюстей (*ЧЧ*)- объектов оригиналов (*ОО*).

Проведен морфологический анализ протезного ложа. С учетом исследований описанных в литературе определены основные параметры анатомических образований беззубых верхних (*ВЧ*) и нижних (*НЧ*) челюстей, которые должны быть учтены при создании стандартных слепочных ложек:

- максимальная ширина (X_{\max}) и длина (Y_{\max}),
- максимальная глубина небного свода *ВЧ* (G) и максимальная высота альвеолярного гребня в дистальных отделах *НЧ* (H),
- ширина переднего отдела челюсти ($X_{\text{перед}}$),
- асимметрия по ширине $assZ$, обусловлена неравномерным развитием левого и правого отделов челюсти,
- угол γ , определяющий форму ската твердого неба

$$\gamma = \arctg(G/Y_G)$$

где Y_G - длина челюсти, на которой наблюдается максимальная глубина небного свода G ,

- угол наклона восходящей ветви альвеолярного отростка α

$$\alpha = 180^\circ - \arctg(H/Y_H)$$

где Y_H - длина проекции восходящей ветви альвеолярного отростка на горизонтальную плоскость.

Установлено, что в большинстве своем высота альвеолярной части *НЧ* в дистальных отделах увеличивается и при этом во многих случаях, наблюдается разность высот $Z_{\text{л}}$ и $Z_{\text{п}}$, соответственно, между левым и правым отде-

лом. Различие этих параметров использовано в качестве меры асимметрии по оси Z :

$$|Z_{Л} - Z_{П}| = assZ$$

где $assZ$ - величина асимметрии в дистальном отделе челюсти, тогда

$$H = \max(Z_{Л}, Z_{П})$$

Все физические модели, получаемые на разных этапах (i) протезирования классифицированы на негативные NM_i и позитивные PM_i , $i \in [1, n]$.

NM_i^O - негативная модель OO . Это может быть любой из видов оттисков протезного ложа: диагностический, анатомический, функциональный.

PM_i^O - позитивная модель OO получаемая по модели NM_i^O

NM_{i+1}^P - негативная модель, полученная по модели PM_i^O . В зависимости от этапа протезирования i модели этого вида могут быть индивидуальной слепочной ложкой или базисом протеза. $ССЛ$ используется на первом шаге итерации ($i=1$), поэтому ее модель определяется как NM_1^P .

Технология протезирования представлена как итерационный процесс получения физической негативной модели- базиса протеза. Каждая i -тая итерация состоит из трех последовательных операций: получение оттиска, его гипсование, изготовление инструмента. Для фрагмента графа, включающего физические модели, формируемые в рамках одной итерации, определены возможные виды оценок δ^j , $j \in [1;5]$ (таблица 1).

Таблица 1. Виды оценок

Вид оценки	Оценка характеризует расстояние между:
$\delta^1(OO, NM_{i-1}^P)$	объектом-оригиналом и негативной моделью полученной по позитивной модели выполненной на $(i-1)$ - м этапе
$\delta^2(NM_i^O, NM_{i-1}^P)$	негативной моделью объекта и моделью полученной по позитивной модели выполненной на $(i-1)$ - м этапе
$\delta^3(OO, NM_i^O)$	объектом-оригиналом и его негативной моделью
$\delta^4(NM_i^O, PM_i^O)$	негативной и позитивной моделями объекта-оригинала
$\delta^5(PM_i^O, NM_{i+1}^P)$	позитивной моделью объекта-оригинала и негативной моделью полученной по ней

Проведен анализ факторов оказывающих негативное влияние на величину этих оценок. Обзор инструментальных средств и тенденций в технологиях протезирования показал, что они в основном направлены на исправление ошибок допущенных на начальном этапе получения оттиска, по причине неправильной анатомической формы $ССЛ$. Выявлены допустимые отклонения размеров $ССЛ$ и $ЧЧ$.

Несмотря на разнообразие выпускаемых в настоящее время $ССЛ$, их всех объединяет один общий недостаток- они недостаточно точно учитывают анатомическую форму протезного ложа. Кроме того, отсутствует система подбора и проектирования необходимой стандартной слепочной ложки. Отсутствует простой и точный инструмент, объединяющий в себе функции измерения нескольких параметров непосредственно в полости рта пациента.

Обоснована цель диссертационной работы и сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе диссертации составлена экспериментальная выборка физических моделей объектов (310 ВЧ, 242 НЧ), предоставленных стоматологической кафедрой Тверской государственной медицинской академии.

Определены инструментально-методические средства для сбора исходных данных по геометрии челюстей человека.

Создана параметрическая модель, позволяющая формировать описания беззубых челюстей в виде кортежа признаков:

$$M1 = \langle X_{\max}, Y_{\max}, G, H, assX, assZ \rangle \quad (1)$$

Сформированы выборки описаний верхних (V1, V3) и нижних (V2, V4) челюстей:

$$V1 = \{v1_i\}, (\forall_i) v1_i = \langle X_{\max}^{BЧ}, Y_{\max}^{BЧ} \rangle$$

$$V2 = \{v2_i\}, (\forall_i) v2_i = \langle X_{\max}^{HЧ}, Y_{\max}^{HЧ} \rangle$$

$$V3 = \{v3_i\}, (\forall_i) v3_i = \langle X_{\max}^{BЧ}, Y_{\max}^{BЧ}, G \rangle \quad (2)$$

$$V4 = \{v4_i\}, (\forall_i) v4_i = \langle X_{\max}^{HЧ}, Y_{\max}^{HЧ}, H \rangle \quad (3)$$

Определены статистические параметры выборок (2,3): R_{\max}, R_{\min} - наблюдаемый диапазон значений признака, D - размах значений, R_{sr} - среднее относительное значение параметра, S_R^2 - дисперсия относительных значений (таблица 2).

Таблица 2. Статистические параметры выборки

Параметры и их характеристики	V3			V4		
	X_{\max}	Y_{\max}	G	X_{\max}	Y_{\max}	H
R_{\max} , мм	73,8	67	26,9	77,7	60,1	32,5
R_{\min} , мм	51,7	45,7	6,9	57,8	42	10
D , мм	23,7	21,3	19,2	30,4	18,1	22,5
R_{sr}	0,852	0,825	0,544	0,872	0,868	0,656
S_R^2	0,003	0,003	0,014	0,002	0,003	0,016

Установлено, что для 98,1 % и 100 % объектов выборок (2, 3), соответственно отношение $Y_{\max}/X_{\max} < 1$.

На основе выражения $(1 - \min\{(Y_{\max}/X_{\max})_i\}) \cdot 100\%$ выявлено, что X_{\max} превышает Y_{\max} не более чем на 26,2 % для верхних и не более чем на 38,9 % для нижних челюстей.

Распределение объектов исследуемых выборок V3, V4 в факторном пространстве $(Y_{\max}/X_{\max}), G$ и $(Y_{\max}/X_{\max}), H$, соответственно показывает, что значение максимальной высоты небного свода (на ВЧ) и альвеолярного гребня (на НЧ) не зависит от X_{\max} и Y_{\max} . Примерно в 92,8 % случаев наблюдается наличие асимметрии $assZ: Z_{л} \neq Z_{п}$. При этом, $assZ$ не превышает 4 мм в 82,8 %.

Проведен кластерный анализ параметрических моделей челюстей с использованием программы STATGRAPHICS Plus for Windows с тем, чтобы определить количество ССЛ для получения оттисков удовлетворяющих тре-

бованиям качества с объектов, составляющих экспериментальную выборку.

Выявлено, что различия между размерами объектов выделяемых в один кластер могут быть больше допустимых. Для того, чтобы каждый выделенный класс находился в области действия *ССЛ*, допустимые отклонения предельных размеров ложки от размеров *ЧЧ* применены в качестве основания для классификации.

Показано, что введенные допустимые отклонения размеров *ССЛ* от *ЧЧ*, позволяют учитывать проявления асимметрии при соблюдении условия:

$$assX < delX_{max}, \quad assZ < delH$$

Проведено сравнение используемых на практике *ССЛ* с представленными параметрическими описаниями *ЧЧ*. По параметрам X_{max} , Y_{max} стандартные ложки совместно могут обеспечить оттиск требуемого качества для 11,6 % *НЧ* и 16,7 % *ВЧ* включенных в выборку. С учетом параметров H на *НЧ* и G на *ВЧ*, это количество соответственно станет равным 0 и 1 %.

Предложена векторная модель $M2$, позволяющая учитывать возможные различия в форме переднего отдела. Наружный контур *ЧЧ*, представленный конечным множеством точек, определен с помощью j -того числа векторов.

$$M2 = \langle d_1, \dots, d_j, \dots, d_{10}, \Delta\varphi \rangle \quad (4)$$

где: d_j - длина j -того вектора, $\Delta\varphi$ - угловой шаг между векторами $\overline{d_j}$ и $\overline{d_{j+1}}$, причем $\Delta\varphi = \varphi_1$, φ_1 - угол, характеризующий направление $\overline{d_1}$.

На основании модели $M2$ сформирована выборка описаний:

$$V5 = \{v5_i\}, (\forall i) v5_i = \langle \{d_{ij}\}, \Delta\varphi = 5^\circ \rangle$$

где: d_{ij} - длина j -того вектора i -той челюсти.

В результате кластеризации объектов представленных моделью (4) выделены 3 типа челюстей по форме переднего отдела (треугольные, овальные, квадратные). Этот результат совпадает с классификацией Нельсона. Кластерный анализ признаков объектов модели (4), позволил выделить элементарные фрагменты, из которых состоит наружный контур *ЧЧ*: передний и боковой отделы и локализовать точку перехода между ними в области 4-5 признаков.

Установлено, что врачи классифицируют форму переднего отдела челюсти, визуальное сравнение параметров $X_{перед}$, X_{max} . Исходя из этого, введен показатель, характеризующий форму переднего отдела *ЧЧ*: $f_x = X_{перед} / X_{max}$.

Изучено распределение значений параметров f_x , α , γ для *ЧЧ*, принадлежащих к самым представительным классам по параметрам X_{max} , Y_{max} . Экспериментальная группа составила 36 *НЧ* и 65 *ВЧ*. Установлено, что ширина переднего отдела относительно дистального на *НЧ* челюстях шире, чем на *ВЧ*. На *НЧ*, приблизительно в одинаковом количестве случаев, наблюдается квадратная (44,4 %) и овальная (41,7 %) форма переднего отдела. Форма альвеолярной дуги верхних челюстей преимущественно готическая (44,9 %).

Изучено частотное распределение *НЧ* в зависимости от наиболее часто встречаемого сочетания значений параметров $\alpha,^\circ$ и $H, мм$:

- 41,6 % при $135 \leq \alpha < 145$ и $24,5 \leq H < 28,5$
- 16,6 % при $140 \leq \alpha < 150$ и $20,5 \leq H < 24,5$
- 11,6 % при $115 \leq \alpha < 130$ и $28,5 \leq H < 32,5$

Выполнен аналогичный анализ значений параметров $\gamma,^\circ$ и $G, мм$ на *ВЧ* :

- 49,3 % при $19 \leq \gamma < 29$ и $10,9 \leq G < 14,9$
- 11,5 % при $14 \leq \gamma < 19$ и $6,9 \leq G < 10,9$
- 18,8 % при $29 \leq \gamma < 39$ и $14,9 \leq G < 18,9$

При использовании качественных показателей для оценки этих характеристик эксперт также выделил три класса значений, определив их как пологие, средние, и крутые.

В результате, параметрическую модель (1) дополнили параметрами, позволяющими идентифицировать форму челюстей.

$$M1 = \langle X_{\max}, Y_{\max}, G, H, f_x, \alpha, \gamma, assX, assZ \rangle \quad (5)$$

Результаты кластеризации в пространстве параметров X_{\max}, Y_{\max} совмещены с ортогональной сеткой, шаг которой соответствует допустимым расстояниям между *ССЛ* и *ЧЧ*. Для дальнейших исследований выбрана клетка сетки, ограничивающая наиболее плотное скопление объектов. В качестве прототипа *ССЛ*, обеспечивающей необходимые условия существования точного анатомического оттиска, использована модель, локализованная в правом верхнем углу клетки. Проведены измерения координат поверхности этой модели. Из общего массива выделили точки, которые составляют поверхности альвеолярного гребня и небного свода (для *ВЧ*). Поверхность альвеолярной дуги представлена как след сечения альвеолярного гребня (*АГ*) при движении вдоль линии наружного контура челюсти (*НКЧ*) (рис.1).

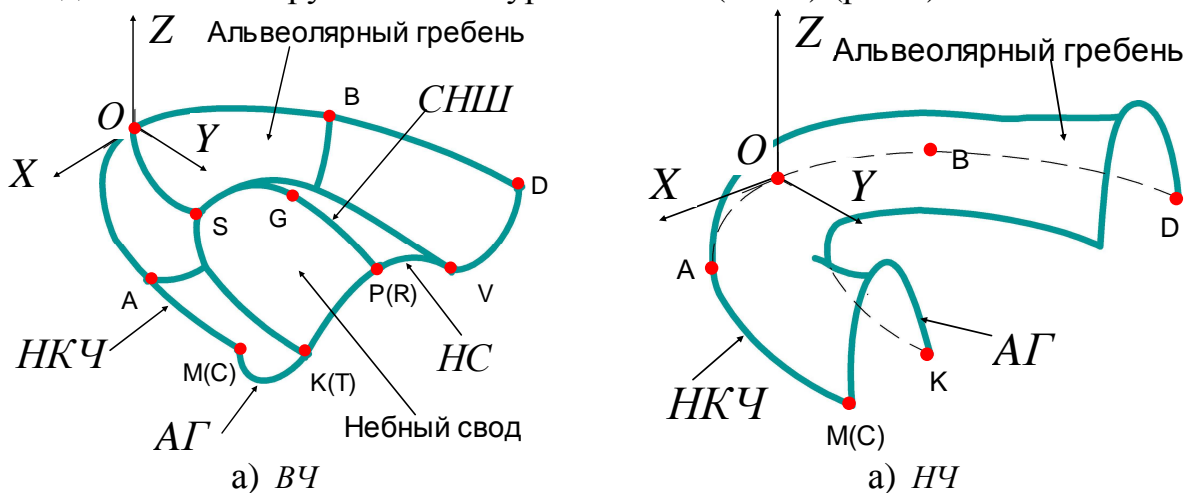


Рис. 1. Каркасная модель полуиндивидуальной оттискной ложки

Поверхность твердого неба можно построить, распространяя поперечное сечение небного свода (*НС*) вдоль линии срединного небного шва (*СНШ*). Установлено, что все направляющие (*НКЧ*, *СНШ*) и образующие (*АГ*, *НС*) линии возможно описать полиномами второго порядка с величиной достоверности $0,95 \leq R^2 \leq 0,99$.

Создана каркасная модель полуиндивидуальной оттискной ложки (рис.

1), включающая 12 уравнений, позволяющих формировать описания рабочей поверхности *ССЛ*. Предложенная модель позволяет создавать полуиндивидуальные оттисковые ложки, учитывающие кроме предельных размеров еще и основные анатомо-топографические особенности *ЧЧ*.

В третьей главе диссертации рассмотрен вопрос разработки алгоритмов, позволяющих в автоматизированном режиме проводить точный подбор или построение необходимой *ССЛ*.

Выполнена формальная постановка задачи подбора. На множестве стандартных слепочных ложек *SSL* необходимо найти такую *ССЛ* $NM_{i_1}^p \in SSL$, при которой оценка расстояния между *ЧЧ* и ложкой будет минимальной:

$$D = \delta_1^1(OO, NM_{i_1}^p) \rightarrow \min_{SSL} D$$

Предложены два способа лингвистического описания (*ЛО*) физических моделей *ЧЧ* и *ССЛ*: количественный $L_{кол}$ и качественный $L_{кач}$.

При первом способе описания параметры модели (2.13) являются нечеткими числами $\tilde{R}(r_i)$:

$$L_{кол} = \langle \tilde{X}_{max}, \tilde{Y}_{max}, \tilde{G}, \tilde{H}, \tilde{\alpha}, \tilde{\gamma}, \tilde{f}_x \rangle \quad (6)$$

Каждому измеренному параметру r_i ставится в соответствие значение функции принадлежности $\mu(R)_i$. Оно характеризует степень принадлежности измеренного параметра смысловому ограничению, которое наложено нечеткой переменной (нечетким числом \tilde{R}) (таблица 3).

Таблица 3. Нечеткие количественные признаки

Смысловое ограничение	Нечеткая переменная
Максимальная ширина челюсти	$\tilde{X}_{max} = \sum_{i=1}^n \mu(X_{max})_i / x_i$
Максимальная длина челюсти	$\tilde{Y}_{max} = \sum_{i=1}^n \mu(Y_{max})_i / y_i$
Максимальная глубина небного свода <i>ВЧ</i>	$\tilde{G} = \sum_{i=1}^n \mu(G)_i / g_i$
Максимальная высота альвеолярного отростка <i>НЧ</i>	$\tilde{H} = \sum_{i=1}^n \mu(H)_i / h_i$
Угол подъема восходящей ветви <i>НЧ</i>	$\tilde{\alpha} = \sum_{i=1}^n \mu(\alpha)_i / \alpha_i$
Угол ската переднего отдела твердого неба <i>ВЧ</i>	$\tilde{\gamma} = \sum_{i=1}^n \mu(\gamma)_i / \gamma_i$
Форма переднего отдела	$\tilde{f}_x = \sum_{i=1}^n \mu(f_x)_i / f_{x_i}$

Предложено использовать унифицированную функцию принадлежности (*ФП*) параболической формы для всех нечетких чисел:

$$\mu(R) = aR^2 + bR + c$$

для определения которой необходимо задать три точки. Первая точка- это вершина параболы: $A(\mu(R)=1; R=r_i)$. У остальных двух точек значения ординат положим равными нулю. У одной из них значение абсциссы равно $r_i - \frac{delR}{2}$, у другой $r_i + \frac{delR}{2}$. Здесь $delR$ - это значение допустимого отклонения размеров *ССЛ* от *ЧЧ*, по каждому из параметров модели (5) составляющих описание (6).

В результате, описание объекта таким способом выглядит как совокупность предложений естественного языка. Каждое предложение состоит из названия нечеткой переменной (таблица 4), грамматической связки «примерно равно» и численного значения измеренного параметра (r_i). Например, «Максимальная ширина челюсти примерно равна 60 мм».

Второй способ предполагает представление каждого компонента модели (5) в виде качественной лингвистической переменной (*ЛП*):

$$L_{\text{кач}} = \langle L_1, L_2, \dots, L_i \rangle, \text{ причем } (\forall_i) L_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} / \mu(T_{ij}) \quad (7)$$

где L_i - это *ЛП* объединяющая j -тое количество термов T_{ij} , причем степень принадлежности к каждому терму определяется значением *ФП* $\mu(T_{ij})$. Символ Σ означает объединение, / использован в качестве разделителя.

Для каждой *ЛП* L_i задано базовое терм-множество T_i с мощностью равной 3. Предусмотрена возможность его расширения с использованием множества модификаторов M на основе набора семантических правил G :

$$T_i^* = T_i \cup G(T_i)$$

Базовое множество i -той *ЛП* ограничено размахом значений ($d = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$) соответствующих признаков.

ФП для термов i -той *ЛП* (T_{i1}, T_{i2} или T_{i3}) заданы унифицировано и инвариантно к виду параметра модели (5).

Предложен обобщенный алгоритм для определения параметров *ФП*. В его основе лежит допущение о построении *ФП* заданной формы по ограниченному числу (m) узловых точек. Для параболической *ФП* $m=3$.

В качестве *ЛП* использованы компоненты модели (5). Названия термов определены на основе понятий, которые врачи используют на практике, описывая *ЧЧ*: $L_1 = \text{Ширина} = (T_{11} = \text{Узкая}) + (T_{12} = \text{Средняя}) + (T_{13} = \text{Широкая})$.

Установлено, что степень соответствия измеренного параметра R_n терму определяется значением *ФП* ($\mu(T_{ij})$) и знаком производной ($\text{sign}(d(\mu(T_{ij})/d(R_n)))$). В соответствии с этим, формальное *ЛО* представленное выражением (7) примет вид:

$$L_{\text{кач}} = \langle L_1, L_2, \dots, L_i \rangle, \text{ причем } (\forall_i) L_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} / \mu(T_{ij}),$$

$$(\forall_j) (\mu(T_{ij}) = f(R_n); \text{sign}(d(\mu(T_{ij})/d(R_n)))$$

ЛО представлено диаграммой, позволяющей визуализировать различия между ССЛ и ЧЧ по каждому параметру в лингвистическом базисе (рис. 3).

Для каждого способа ЛО предложен способ оценки расстояния между физическими моделями. В рамках $L_{кол}$ (6) расстояние между нечеткими количественными признаками рассчитывается как арифметическая разность с использованием принципа обобщения предложенного Л. Заде.

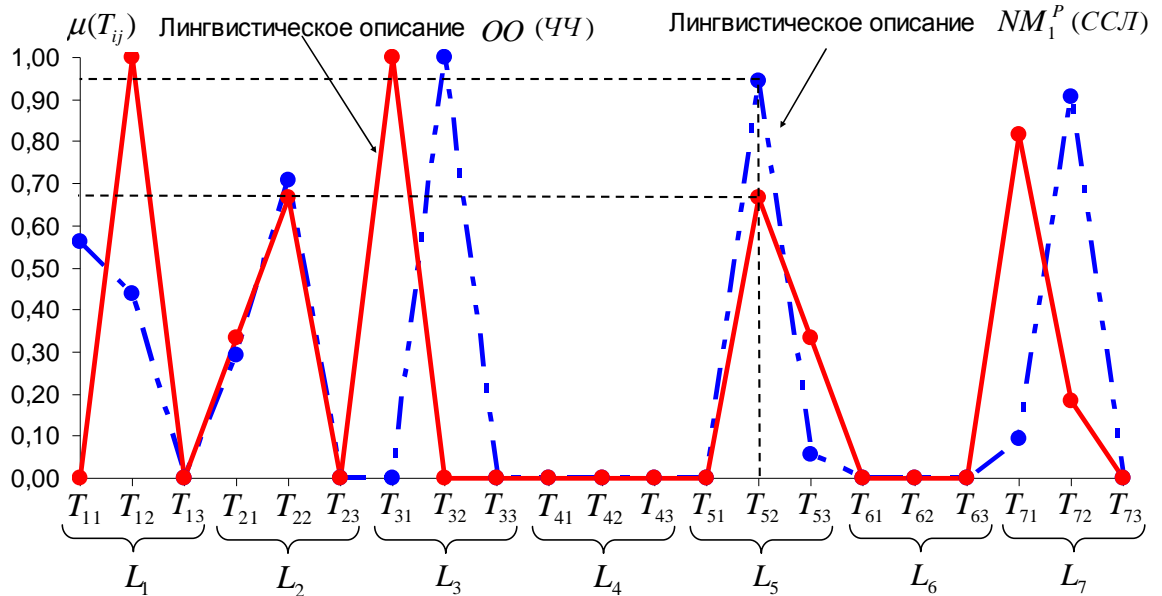


Рис. 2. Лингвистическое описание ССЛ и ЧЧ

Второй способ расчета расстояния предложен для ЛО $L_{кач}$. При таком подходе расстояние Δ_i между ЧЧ и ССЛ зависит от совместного сочетания: значений ФП, знаков их производных, принадлежности к термам.

Исследования показали, что при мощности терм-множества равной 3 реализуем 21 вариант совместного сочетания указанных признаков. При этом оценка расстояния Δ_i между признаками сравниваемых объектов представлена в виде интервала. Оценки значений параметров полученные таким способом использованы в качестве базовой шкалы для нечеткой переменной NP «Малое различие», заданной трапециевидной ФП.

В рамках задачи подбора инструмента сформулированы два необходимых условия, определяющие возможность сопряжения челюсти и ложки:

$$X_{\max}^{ЧЧ} < X_{\max}^{ССЛ}, f_X^{ЧЧ} < f_X^{ССЛ}$$

и пять достаточных условий:

$$Y_{\max}^{ЧЧ} \leq Y_{\max}^{ССЛ}, H^{ЧЧ} \leq H^{ССЛ}, \gamma^{ЧЧ} \geq \gamma^{ССЛ}, G^{ЧЧ} \geq G^{ССЛ}, \alpha^{ЧЧ} \leq \alpha^{ССЛ}$$

На основе качественного подхода построена система выбора ССЛ как некоторых, заранее известных вариантов $B_1 \dots B_m$. Выходное высказывание представляет собой результат выбора ССЛ из набора врача:

$$B_j = \langle \beta_v \text{ есть } v_j \rangle, B_j \in \{B_1 \dots B_m\}$$

где v_j - четкое значение соответствующее j -тому варианту проектирования, например шифр-код (обозначение) ССЛ, β_v - это четкое высказывание, определяющее j -тый вариант ССЛ со степенью истинности равной 1.

Рассуждения врача при выборе *ССЛ* можно описать продукционными правилами. Например, < ЕСЛИ верхняя челюсть узкая ИЛИ средняя по ширине И короткая по длине И с низким небным сводом И готическая ИЛИ овальная по форме переднего отдела И с пологим скатом переднего отдела твердого неба, ТО выбираем оттискную ложку v_j >

Входное нечеткое высказывание представлено конъюнкцией *ЛП*: $\tilde{A}_m^{ЧЧ} = \min\{L_1...L_i\}$. Причем, каждая *ЛП* оценивается одним или дизъюнкцией двух термов: $L_i = T_{i1}$ или $L_i = T_{i2} \vee T_{i3}$. Исходя из этого составлен набор, содержащий 39 мета-правил, для генерации входных нечетких высказываний. Степень истинности μ_{mp}^j схемы вывода для различных *j*-тых вариантов оттискных ложек определяется по формуле:

$$\mu_{mp}^j(v_j) = 1 \& \prod_{j=1}^n [1 - \mu(\tilde{A}_j^{BЧ}) + \mu_j(v)]$$

где *n* - число *ССЛ* (вариантов для выбора), символ «П» означает логическую операцию конъюнкции. В качестве решения необходимо выбрать значение v_j , при котором степень истинности μ_{mp}^j максимальна.

На основе указанных подходов разработан алгоритм *AL1* подбора *ССЛ* инвариантный к способам построения *ЛО*, вычисления оценок базовых параметров и правилам их интерпретации (рис. 3).

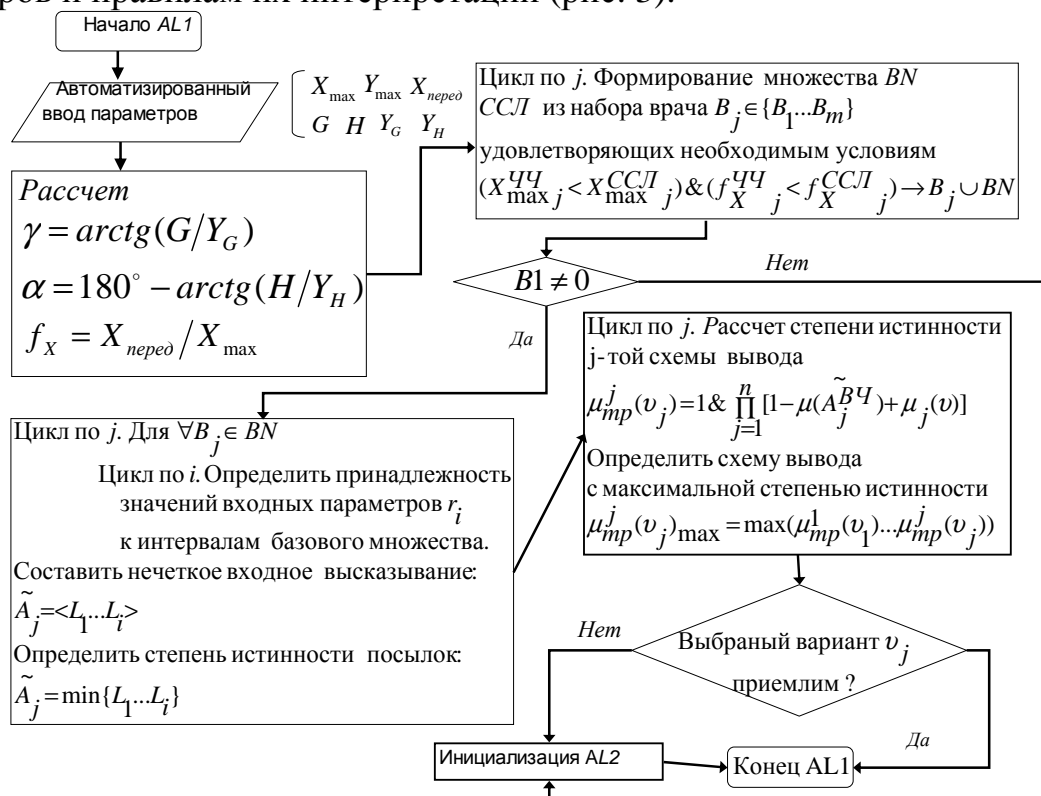


Рис.3. Алгоритм подбора *ССЛ*

Разработан алгоритм *AL2*, позволяющий определить значения базовых элементов каркасной модели и выполнить из них компоновку новой *ССЛ* для *ЧЧ* с редким сочетанием формы и размеров или с проявлением значительной асимметрии по ширине (рис. 4).

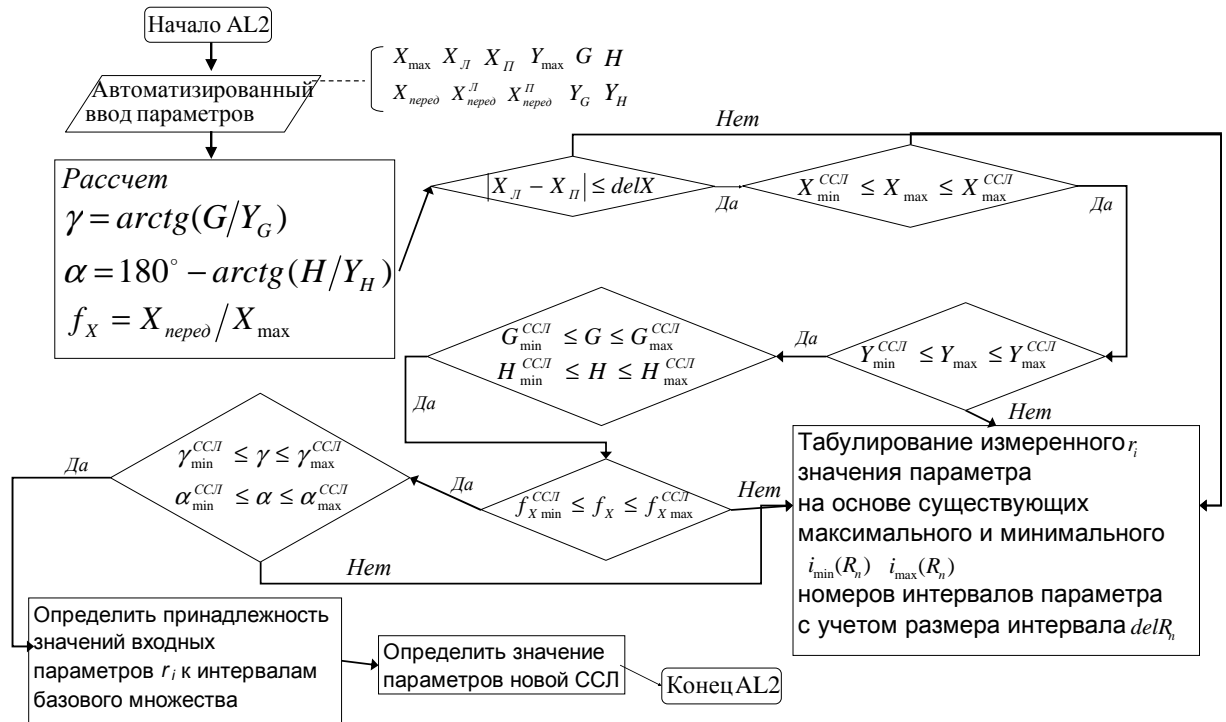


Рис.4. Алгоритм автоматизированного построения ССЛ

$R_{\max}^{ССЛ}, R_{\min}^{ССЛ}$ - наибольшие и наименьшие значения параметров ССЛ существующих в наборе врача из числа модели (5)

В четвертой главе диссертации рассмотрены вопросы реализации инструментального и программного обеспечения автоматизированной системы подбора и построения ССЛ.

Предложен новый способ автоматизированного измерения базовых параметров непосредственно на челюсти человека и разработано устройство для его осуществления. Способ заключается в следующем. Триангуляционный датчик расстояния располагается перед ротовым отверстием пациента, так, чтобы было возможно позиционировать световое пятно луча на уздечке верхней и нижней губы, на верхнечелюстных и нижнечелюстных буграх, на заднем крае и в наивысшей точке небного свода (на ВЧ). Датчик, ВЧ и НЧ должны быть неподвижны между собой во время проведения измерений. Пользователь последовательно позиционирует лазерный луч на анатомических образованиях, расстояние между которыми необходимо измерить.

Устройство содержит: триангуляционный датчик расстояния, энкодеры вертикального, горизонтального угла, поворотную рамку.

Предложена архитектура системы, включающая компоненты (рис. 5):

- базы данных и базы знаний обеспечивают регистрацию, хранение, поиск, просмотр, редактирование, удаление гетерогенной информации содержащейся в них,

- модули- исполнительные элементы системы предназначены для преобразования информации.

База данных пациентов (БД_П) содержит:

-фактографические данных пациентов (фамилия, имя, отчество, данные о медицинском страховании, и. т.п.);

- базовые параметры челюстей из числа модели (5);

- виртуальную копию съемного протеза, полученную с помощью объемного сканирования;

- спецификацию зубного протеза, содержащую описание материала базиса протеза, формы, размеров, текстуры поверхности искусственных зубов. Это необходимо для восстановления утраченного (утраченного, сломанного) протеза без повторения всего технологического цикла по его изготовлению.

- лингвистическое описание челюсти;

Базы данных прецедентов (БД_ПСЛ) и оттискных ложек (БД_ОЛ) содержат, соответственно:

- ЛО полуиндивидуальных слепочных ложек (ПСЛ) и ССЛ,

- буквенно-цифрового обозначения (кода-шифра) ПСЛ и ССЛ,

- файлы с массивами координат точек рабочей поверхности ПСЛ и ССЛ в формате *.stl.

База знаний (БЗ) содержит правила построения нечетких высказываний о принадлежности ССЛ к определенному классу (мета-правила), нечеткие высказывания, функции принадлежности, алгоритмы $AL1$, $AL2$.

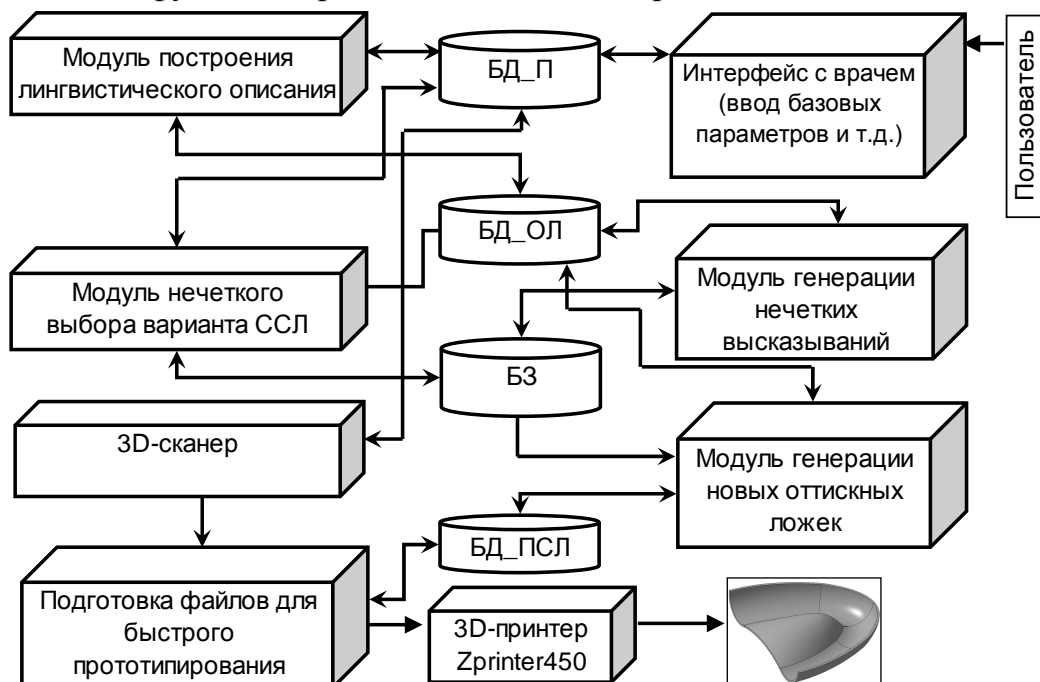


Рис. 5. Архитектура автоматизированной системы подбора и построения физических моделей ССЛ

Модули системы выполняют следующие функции: 1. интерфейс позволяет пользователю или администратору в диалоговом режиме осуществлять ввод данных (значений базовых параметров челюсти или ложки, фактографических данных пациента) в систему, 2. поиск ССЛ для пациента из БД_П, 3. построение лингвистического описания ЧЧ и ССЛ, 4. оценка степени соответствия определенного варианта ССЛ и ЧЧ, 5. прогноз возможных отклоне-

ний базовых параметров *ССЛ* от *ЧЧ*, 6. визуализация виртуальных моделей *ССЛ*, *ПСЛ* и сканированных копий съемных протезов, 7. расчет каркасной модели оттисковой ложки, 8. оцифровка съемного протеза челюсти и создание его реконструкции, 9. изготовление физических моделей *ССЛ*, *ПСЛ* и съемных протезов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Процесс протезирования полными съемными протезами представлен как итерационная последовательность создания физических моделей с постепенным приближением (от этапа к этапу) их формы и размеров к беззубой челюсти человека. Проведен анализ накопления ошибок в этом процессе.

2. Предложена и обоснована структура параметрических моделей верхней и нижней челюстей, а также создана векторная модель, позволяющая выделять и количественно оценивать различия в форме альвеолярной дуги.

3. Создана математическая модель поверхности протезного ложа беззубой челюсти, включающая 12 уравнений, позволяющих по ограниченному числу базовых параметров рассчитывать координаты точек, составляющих рабочую поверхность полуиндивидуальной оттисковой ложки.

4. Предложена методика построения ряда моделей слепочных ложек с учетом свойств выборки, содержащей наиболее характерные примеры челюстей встречающихся в данном регионе.

5. Разработан метод оценивания расстояния между лингвистическим описанием модели челюсти и лингвистическим описанием модели слепочной ложки, основанный на продукционных правилах, отражающих в лингвистическом базисе закономерности в сочетаниях базовых параметров челюсти человека.

6. Разработаны алгоритм выбора слепочной ложки на основе нечетких оценок компонентов параметрической модели челюсти, а также алгоритм определения параметров полуиндивидуальной оттисковой ложки для редких сочетаний форм, размеров челюстей и возможного проявления значительной асимметрии по ширине.

7. Разработана архитектура автоматизированной системы подбора и изготовления стандартных оттисковых ложек.

8. Предложен новый способ автоматизированного измерения базовых параметров непосредственно на челюсти человека и разработано устройство, позволяющее проводить измерения семи базовых параметров непосредственно на челюсти пациента.

9. Создано программное обеспечение модуля построения полуиндивидуальных оттисковых ложек.

10. Проведено исследование работы отдельных модулей комплекса в клинических условиях.

11. По предложенным моделям и методикам создан новый набор оттисковых ложек для *ВЧ* и *НЧ*, позволяющий получать оттиск требуемого качества за одну процедуру. По сравнению с *ССЛ* новый инструмент позволяет

уменьшить расход оттисковой массы в 4,5-6 раз, сократить трудо-временные затраты связанные с припасовкой базиса.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Зинякин Р.С. Автоматизированная система построения физических моделей на основе лингвистических описаний прецедентов [Текст]/ Н.Н. Филатова, Р.С. Зинякин // Программные продукты и системы. - № 3(91). – 2010-С. 146 - 149.

Другие статьи и материалы конференций:

2. Зинякин Р.С. Разработка моделей классов беззубых верхних челюстей по параметрам рабочих индивидуальных ложек [Текст]/ Р.С. Зинякин, К.Г. Саввиди // Верхневолжский медицинский журнал. Тверь, 2009, № 3, С. 22 - 25.

3. Зинякин Р.С. Математическое обоснование необходимого количества типоразмеров стандартных оттисковых ложек для беззубой нижней челюсти [Текст]/ Р.С. Зинякин, К.Г. Саввиди // Верхневолжский медицинский журнал. Тверь, 2009, № 4, С. 18 - 20.

4. Зинякин Р.С. Кластерный анализ параметрических моделей челюстей человека [Текст]/ Р.С. Зинякин // Вестник Тверского государственного технического университета– Вып. 16.–Тверь: ТГТУ, 2010. С. 72-75.

5. Зинякин Р.С. Математическая модель челюсти для проектирования полуиндивидуальных оттисковых ложек [Текст]/ Р.С. Зинякин // Вестник Тверского государственного технического университета– Вып. 17.–Тверь: ТГТУ, 2010. С. 117-120.

6. Зинякин Р.С. Устройство для измерения зубных или альвеолярных дуг [Текст]: пат. 92785 Рос. Федерация: МПК А61С 19/04/ Филатова Н.Н., Зинякин Р.С.; заявитель и патентообладатель ГОУФПО Тверской гос. техн. у-нт. №2009146839/22; заявл. 16.12.2009; опубл. 10.04.2010, Бюл. №10.- 3 с: ил.

7. Зинякин Р.С. Автоматизированное построение новых стандартных слепочных ложек [Текст]/ Р.С. Зинякин // Актуальные вопросы современной науки. Материалы IX Международной научно-практической конференции (6 сентября 2010 г.) С. 72 -76.