ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕГОЧНОЙ ПАТОЛОГИИ У РАБОТНИКОВ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Игнатова А.М.¹, Игнатов М.Н.¹, Землянова М.А.², Водянов С.С.³, Субботин В.М.⁴

¹ГОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, e-mail: iampstu@gmail.com;

²Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Пермь, e-mail: zem@fcrisk.ru;

³Краевой противотуберкулезный диспансер, Пермь, e-mail: iampstu@gmail.com;

⁴Пермский государственный медицинский университет им. ак. Е.А. Вагнера, Пермь, e-mail: rector@psma.ru

Статья посвящена вопросу диагностики начальной стадии развития профессиональной патологии легких у работников сварочного производства по результатам компьютерной томографии легких. Для этого автор предлагает использовать метод анализа цифровых изображений с построением трёхмерной модели легких и бронхиального дерева. Показательной характеристикой в предложенном методе является отношение площади поверхности бронхиального дерева к его объёму. Для прогнозирования индивидуального безопасного стажа работы авторы предлагают методику массового популяционного исследования. Кроме того, авторы высказывают мнение, что для повышения достоверности прогноза следует обратиться к анализу самого поражающего фактора – твердым частицам сварочного аэрозоля. Результаты предшествующих исследований показали, что следующие параметры аэрозольных частиц: общая площадь поверхности сферических частиц, общая площадь поверхности несферических частиц, суммарная площадь поверхности частиц - отличаются для аэрозолей, образованных при сварке электродами с различными покрытиями.

Ключевые слова: компьютерная томография, профессиональные заболевания, медицинская диагностика, анализ изображений, легкие, дыхательная система, бронхиальное дерево, трехмерное моделирование, визуализация, анатомия.

USING THE ANALYSIS OF COMPUTER TOMOGRAPHIC IMAGES FOR IDENTIFICATION AND PREDICTION OF PULMONARY PATHOLOGY FOR WELDING WORKERS

Ignatova A.M.¹, Ignatov M.N.¹, Zemlynova M.A.², Vodynov S.S.³, Subboyin V.M.⁴

¹Perm State National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: iampstu@gmail.com;

²Federal Scientific Center of Medico-Prophylactic Technologies for Health Risk Management, Perm, e-mail: zem@fcrisk.ru;

³The regional antituberculous dispensary, Perm, e-mail: iampstu@gmail.com;

⁴Perm State Medical University. Ac. E.A. Wagner, Perm, e-mail: rector@psma.ru

The article is devoted to the issue of diagnostics of the initial stage of the development of occupational lung pathology in welding production workers based on the results of computed tomography of the lungs. For this, the author suggests using the method of analyzing digital images with the construction of a three-dimensional model of lungs and bronchial tree. An indicative characteristic in the proposed method is the ratio of the surface area of the bronchial tree to its volume. To predict individual safe work experience, the authors suggest a method of mass population research. In addition, the authors express the opinion that in order to increase the reliability of the forecast, one should turn to the analysis of the most striking factor - solid particles of the welding aerosol. The results of previous studies showed that the following parameters of aerosol particles: the total surface area of spherical particles, the total surface area of non-spherical particles, the total surface area of particles differ for aerosols formed when welding with electrodes with different coatings.

Keywords: computed tomography, occupational diseases, medical diagnostics, Image analysis, lungs, respiratory system, bronchial tree, three-dimensional modeling, visualization, anatomy.

Сварочные работы сопряжены со многими опасными для здоровья факторами, а именно: с высокой температурой, контактом с металлическими расплавами, воздействием УФ-излучения, но, прежде всего, с непосредственным действием сварочных аэрозолей на

дыхательную систему. Существуют меры по снижению пагубного влияния сварочных аэрозолей на организм работающих, но, как показывают исследования, проведенные в 2014 г. [1], несмотря на совершенствование индивидуальных средств защиты и промышленных вентиляционных систем, смертность среди сварщиков от легочных заболеваний продолжает возрастать.

В работах [2-4], посвященных причинам роста смертности от профессиональных заболеваний сварщиков, доказано, что она коррелируется с увеличением объемов сварочных работ с легированными сталями, которые содержат хром, никель и прочие компоненты, оказывающие токсичное и канцерогенное действие. В настоящее время порядка 45% сварщиков постоянно работают легированными сталями по технологии ручной дуговой сварки; как известно, время экспозиции сварочными аэрозолями при таком виде сварки по сравнению с другими максимально.

Поскольку состав свариваемого металла и сварочных материалов определяют состав сварочных аэрозолей, из статистической теории корреляции следует, что именно изменение в составе свариваемых и вспомогательных материалов является причиной увеличения смертности от профессиональных заболеваний среди сварщиков.

Оценка рисков для здоровья, обусловленных действием сварочных аэрозолей, сопряжена с тем, что профессиональные патологии сварщиков, такие как фиброз и силикоз, развиваются в течение 10-30 лет после начала трудовой деятельности. При этом ряд исследований [5] указывает, что частота заболеваний респираторными заболеваниями у сварщиков, по сравнению с работниками других специальностей того же предприятия, отличается на величины, выходящие за рамки статистических погрешностей. Современные способы лабораторной диагностики ориентированы на выявление дисрегуляторных процессов в организме человека на ранних стадиях [6-7], что существенно повышает точность прогнозов и оценки риска развития патологии. Однако существующие методики прогнозирования и оценки влияния сварочных аэрозолей на организм человека не учитывают важные характеристики самих аэрозолей, а именно: дисперсный состав частиц твердой составляющей, их морфологию и химическую активность.

Указанные сведения показывают актуальность поиска новых подходов в диагностике развития профессиональных заболеваний среди сварщиков, обусловленных воздействием сварочных аэрозолей, с учетом параметров сварочных аэрозолей и особенностей производственного процесса.

Цель исследования

Цель исследования – определить перспективу выявления начальной стадии развития легочной патологии у работников сварочного производства по результатам компьютерной

томографии (КТ), используя метод анализа изображений, и оценить возможность использования предложенного метода, для поиска взаимосвязи между развитием патологии и особенностями производственного процесса.

Методы исследования

Анализ современных отечественных и зарубежных публикаций в области проблематики профессиональной патологии легочных заболеваний указывает на высокий интерес к использованию средств КТ для ее прогнозирования и диагностики развития на ранних стадиях. Современные методики анализа результата КТ позволяют извлекать из данных, полученных при послойной рентгеновской съемке, все больше информации. Значительную роль в увеличении информативности метода КТ играет цифровой анализ изображений. Накопленный опыт указывает на то, что многие патологические изменения ассоциируются с изменением объема легких и бронхиального дерева (нижних дыхательных путей), некоторые патологии, кроме того, связаны с изменением числа концевых дыхательных единиц. Для извлечения данных о номинальных характеристиках легких и их дальнейшего анализа используют метод трехмерной реконструкции, в исследовании использовалось универсальное программное обеспечение DICOM и ImageJ-FiJI.

Объекты исследования представляли собой сканы КТ пациентов с начальной стадией легочной патологии и без нее. Использовался режим с пониженной дозой облучения 0,2–0,3 мЗв (пиковое напряжение 100 кВп, ток в рентгеновской трубке 20–40 мА) с толщиной слоя съемки 0,5 см. Количество изображений в сканах составило 500 и 650 штук, для каждого пациента было проведено по три сканирования.

Для характеристики особенностей частиц сварочного аэрозоля как поражающего фактора использовали данные исследований [8], полученные при анализе образцов сварочного аэрозоля, образованного при ручной дуговой сварке электродами основным (KobeSteel LB 52U), рутиловым (ESAB OK 53.70, OK 46.00), целлюлозным (Kjellberg-Finsterwalde PrimaBlue) и кислым (ильменитовым) покрытиями, соответствующими составу МР-3М ТУ 1272-303-00187211-2002 покрытий. Исследования, использованные в работе, проводились на образцах частиц твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА), осажденных на углеродный скотч, методом растровой рентгеновской сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения с рентгено-флуоресцентной приставкой S3400N HITACHI (Япония).

Результаты и их обсуждение

При анализе каждого из изображений КТ (по три на пациента) на них были выделены зоны тканей легких и ветвление бронхиального дерева, по результатам обработки плоских послойных изображений были построены трехмерные модели легочных систем (рис. 1).

Данные по этим системам были проанализированы расчетными методами, в результате было определены объем легких, объем бронхиального дерева, площадь поверхности бронхиального дерева и число отдельно выделяемых сегментов дерева для двух систем (табл. 1). Объем легких и объем бронхиального дерева, указанные в таблице, не являются прямыми аналогами различных объемных показателей этапов дыхания, так как оценивают именно «материальные» измерения, и не определяют объем газа, заполняющего легкие при вдохе и выдохе.

Таблица 1

Результаты анализа сканов КТ потрехмерной реконструкции

№ комплекта сканов	Наличие патологии	Пол пациента	Вес пациента, кг	Рост пациента, см	Объём легких, см ³	Объём бронхиального дерева, см ³	Площадь поверхности бронхиального дерева, мм ²	Число отдельных элементов в реконструкции, шт.	Среднее сечение бронхиального канала, мм
1	нет	Ж	81	172	1736,2	111,48	350058,2	20468	5,42
2	есть	Ж	53	163	1523,8	89,84	311872,5	19754	5,12

При сравнении данных было установлено, что сами по себе величины объемов не так эффективны при идентификации патологии, как их соотношение. Так, соотношение объема бронхиального дерева и объема легких у пациента с патологией составило 0,058, а у пациента без патологии - 0,064, при этом отношение площади поверхности бронхиального дерева к его объему для пациента с патологией составило 0,21, а для пациента без патологии - 0,23. В значительной степени показательным является число отдельных элементов реконструкции, этот показатель позволяет оценивать не только усредненные данные по одному пациенту, но и качество проведенной реконструкции и статистические параметры отклонений в расчетах.

*Рис. 1. Трехмерная реконструкция данных томографии пациентов:
а – легкие, б – разрез в области ветвления крупных бронхов, в – бронхиальное дерево
пациента без патологии, г – бронхиальное дерево пациента с начальной патологией*

Различия, установленные для показателей результатов оценки компьютерной томографии пациентов с патологией и без, показывают, что соотношения, рассмотренные выше, могут являться индикаторами патологических изменений.

Данные, получаемые при анализе изображений КТ, могут быть использованы для создания моделей прогнозирования. Анализ публикаций [9] указывает на необходимость использования при прогнозировании рисков развития патологии следующих групп показателей:

- индивидуальные особенности дыхательной системы работающего;
- время воздействия сварочных аэрозолей и уровень их концентрации в зоне дыхания работающего;
- параметры частиц сварочного аэрозоля.

Рассмотрим каждую группу параметров в отдельности. Индивидуальные особенности строения легких и бронхиального дерева человека, как предполагается, влияют на скорость развития патологии, это значит, что безопасный трудовой стаж для каждого имеет индивидуальную продолжительность. Предсказать скорость развития патологии в зависимости от из начальных параметров легких и бронхиального дерева работающего можно при достаточном популяционном исследовании. Исследования по определению индивидуального безопасного периода работы могут быть основаны на моделях с дискретным временем.

Для построения модели с дискретным временем необходимо разделение исследуемой популяции по времени работы в качестве сварщиков. В первый год исследования КТ должны быть дополнены результатами анкетирования, содержащими сведения о наличии у пациентов вредных привычек, наследственной предрасположенности к заболеваниям легких, но самое главное, об особенностях их профессиональной деятельности: основной вид сварки, характер работы, используемые материалы и т.д. На следующий год производится повторное обследование методом КТ. Результаты первого и второго года анализируются в совокупности. Результатом такого исследования будет являться кривая, отражающая изменение соотношений объема бронхиального дерева и объема легких; отношений площади поверхности бронхиального дерева к его объему в течение года для работников с разным трудовым стажем.

Время воздействия сварочных аэрозолей на человека зависит от вида технологического процесса, концентрации аэрозоля в рабочей зоне, интенсивности режимов и расстояния, на котором находится рабочий от источника аэрозоля. Для цехов сварочного характера могут быть построены определённые «карты концентрации», которые определяли бы зоны цеха с разным уровнем воздействия аэрозоля на организм работающих.

Наконец, параметры частиц сварочного аэрозоля, как показала практика измерений, описанная в предыдущем разделе, в значительной степени отличаются от типов покрытий.

Обширность параметров ставит задачу объединения их в единую методику оценки рисков. На данном этапе исследования прогнозирование может быть осуществлено как вычисление изменений величин соотношений объема бронхиального дерева и объема легких; отношение площади поверхности бронхиального дерева к его объему с помощью формул:

$$d \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{01}}{V_{02}} \cdot (K_z + K_p), \quad (1)$$

$$d \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_{01}}{v_{02}} \cdot (K_z + K_p), \quad (2)$$

где $d(V_1/V_2)$ – прогнозируемое отношение объема бронхиального дерева и объема легких, см³;

(V_{01}/V_{02}) – отношение объема бронхиального дерева и объема легких на момент исследования, см³;

$d(v_1/v_2)$ – прогнозируемое отношение площади поверхности бронхиального дерева к его объему, см³;

(V_{01}/V_{02}) – отношение площади поверхности бронхиального дерева к его объему на момент исследования, см³;

K_z – коэффициент, отражающий воздействие аэрозолей по положению работающего в пространстве цеха;

K_p – коэффициент, отражающий особенности параметров частиц, воздействующих на работающего.

Уточнение коэффициентов формулы является предметом будущих исследований.

Для повышения точности прогнозирования предлагается использовать характеристику твердых составляющих, которые являются основной причиной развития профессиональной патологии. Данные фракционного анализа частиц сварочного аэрозоля с учетом их морфологии были проанализированы с точки зрения соотношения объема и площади поверхности сферических и несферических частиц для разных видов покрытий (рис. 2, табл. 2). Соотношение площадей поверхности сферических и несферических частиц к общей площади поверхности частиц аэрозоля наглядно демонстрирует, что вид покрытия в значительной степени влияет на их характеристики.

Таблица 2

Параметры частиц сварочного аэрозоля в пересчете на 1 гр

Вид покрытия	Общая площадь поверхности сферических частиц, мм ² (S ₁)	Общая площадь поверхности несферических частиц, мм ² (S ₂)	Суммарная площадь поверхности частиц, мм ² (S ₃)	S ₁ /S ₃	S ₂ /S ₃
Рутиловое	4,75	4,6	9,35	0,50	0,49
Основное	3,6	22,35	25,95	0,13	0,86
Кислое	3,73	8,18	11,91	0,31	0,68
Целлюлозное	3,35	16,59	19,94	0,16	0,83

а

б

в

г

Рис. 2. Дисперсный состав частиц ТССА различной формы, образованных электродами разного типа: а - основного, б- рутилового, в - целлюлозного, г - кислого

■ несферические ■ сферические

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что признаки начальной стадии развития дизрегуляции у работников сварочного производства на доназальной стадии профессиональной патологии могут быть обнаружены КТ с помощью метода анализа изображений. Анализ изображений представляет собой построение трехмерной реконструкции и вычисление по ней следующих параметров: соотношение объема бронхиального дерева и объема легких; отношение площади поверхности бронхиального дерева к его объему.

Для поиска взаимосвязи между показателями патологических изменений в легких сварщиков следует обратиться к анализу самого поражающего фактора – частиц сварочного аэрозоля. Для этих целей авторы статьи ранее также обращались к методу анализа изображений. Результаты предшествующих исследований показали, что следующие параметры аэрозольных частиц: общая площадь поверхности сферических частиц, общая площадь поверхности несферических частиц, суммарная площадь поверхности частиц отличаются для аэрозолей, образованных при сварке электродами с различными покрытиями.

Предложен принцип использования моделей с дискретным временем для прогнозирования развития профессиональной патологии сварщиков.

Список литературы

1. Соколов Е.И., Федосенко Н.Б., Яценко А.А. Математическое и вычислительное моделирование аэромеханики легких человека // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. - 2012. - №4 (158). - С.32-39.
2. Tawhai M., Hunter P., Tschirren J. et al. CT-based geometry analysis and finite element models of the human and ovine bronchial tree // Journal of applied physiology. - 2005. - №97. – P. 10-23.
3. Делова О.В., Денисенко В.П. Гигиеническая оценка факторов окружающей среды и риска для здоровья населения // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. - 2010. – Т. 9. - №4. - С. 810-813.
4. Gao D., Gao X., Ni C., Zhang T. MGRG-morphological gradient based 3D region growing algorithm for airway tree segmentation in image guided intervention therapy // International symposium on bioelectronics and bioinformatics. - China, 2011. - P. 76–89.
5. Соколова Л.А., Попова О.Н., Калинина М.М. и др. Прогнозирование риска развития профессиональных заболеваний среди сборщиков корпусов металлических судов

машиностроительного предприятия // Экология человека. - 2015. - №1. - С.10.

6. Самсонов К.В. Возраст как прогностический признак тяжести течения гнойно-некротических заболеваний легких // Бюл. физ. и пат. дых. -2010. - №36. - С.41-44.

7. Игнатова А.М. Алгоритм обработки изображений тонкослойной компьютерной томографии легких человека для создания трехмерной модели внешних контуров бронхиального дерева//Бюллетень физиологии и патологии дыхания. - 2017. – Вып. 64. - С. 23-29.

8. Ильин А.В., Перельман Ю.М., Леншин А.В., Приходько А.Г. Применение компьютерной томографии с трехмерной волюметрией в диагностике нарушений вентиляционной функции легких у больных бронхиальной астмой // Бюл. физ. и пат. дых. - 2014. - №51. - С.33-37.

9. PietzschT., SaalfeldS., PreibischS. BigDataViewer: visualizationandprocessingforlargeimagedatasets // NatureMethods. – 2015. – Vol. 12(6). – P. 481-483.