

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ГИБКИХ СТРУКТУРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОРГАНИЗМА

П.И.Бегун\*, П.Н.Афонин\*, Д.Н.Афонин\*\*

\*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
197376, Санкт-Петербург, ул. Попова, 5

\*\*Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии  
194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 32  
spb489@sph.sitek.net

Диагностическая оценка напряженно-деформированного состояния человеческих структур в норме и патологии является весьма важным этапом при проведении исследований в самых различных областях современной медицины. Это, во-первых, обуславливается необходимостью определения состояния того или иного органа или системы, прогнозирования развития в нем определенных патологических процессов, а во-вторых, необходимостью выбора оптимальных условий для лечебного воздействия на этот орган или систему. В этой связи использование средств и возможностей прикладной механики и биомеханики невозможно переоценить. Тем не менее, основной сложностью при подобных исследованиях остается недостаток информации о тех или иных свойствах исследуемого объекта *in vivo*, об особенностях его функционирования. Это заставляет особенно тщательно подходить к выбору расчетных схем, к формированию на их основе, при использовании метода динамического подобия, математических и физических моделей.

В настоящей статье рассматриваются вопросы построения расчетных схем, математических и физических моделей для исследования проницаемости кожных капилляров, компрессии спинного мозга при воспалительных заболеваниях позвоночника, прочности и жесткости аневризм.

### 1. Некоторые аспекты моделирования биомеханики кожной микроциркуляции

Одним из актуальнейших направлений исследования микроциркуляции является изучение транскапиллярного обмена, в значительной степени обеспечиваемого проницаемостью стенки капилляра, т.е. её способностью избирательно пропускать различные вещества и форменные элементы крови. В то время, как методы экспериментального исследования транскапиллярного обмена на животных [1, 2] разработаны и внедрены в практику, в клинической практике отсутствуют методы, позволяющие точно, объективно и неинвазивно прижизненно исследовать состояние микроциркуляторного русла [3, 4].

Наиболее доступными для исследования являются капилляры кожи, изменения в которых достаточно объективно отражают состояние микроциркуляторного русла всего организма. Нами был разработан новый неинвазивный импедансометрический метод определения проницаемости капилляров кожи [5], заключающийся в оценке состояния кожной микроциркуляции по кондуктивным изменением слоя дермы до и после воздействия на исследуемый участок кожи отрицательным давлением. Для реализации этого метода предложен оригинальный 3-х электродный способ, на который было получено положительное решение о выдаче патента РФ. Способ позволяет судить, при заданной конфигурации электромагнитного поля, о сопротивлении в глубине кожного слоя по распределению потенциала на его поверхности.

Исследования влияния деформации кожи на изменение параметров транскапиллярного обмена потребовало проведения анализа распределения перемещений как в самом слое кожи, так и в подкожных тканях. Для этого нами были построены различные расчетные схемы и математические модели [6, 7, 8]. Во всех случаях участок кожи с подкожными тканями в окрестности кюветы представляли плитой, находящейся под действием распределенной осесимметричной нагрузки на круге радиусом, равным радиусу вакуумной кюветы.

Вычисления производились с использованием метода конечных элементов в пакете прикладных программ Cosmos/m. В процессе вычислений, в соответствии с принятой расчетной схемой, строилась трехмерная геометрическая модель, производилось ее разбиение на конечные элементы, задавались граничные условия, производился расчет напряжений и перемещений. Конечные элементы выбирались типа 8-ми узловых трехмерных сплошных элементов.

По результатам вычислений узловых напряжений и перемещений формировалась внешняя база данных в Microsoft Excel 97. Дальнейший расчет необходимых параметров производился с использованием разработанного нами программного обеспечения, реализованного в среде визуального программирования Visual Basic.

Учитывая то, что кожа расположена на подкожной жировой клетчатке, позволяющей слою кожи достаточно свободно скользить по ней, а так же то, что первоначальная деформация поверхности кожи происходит за счет "подсасывания" окружающей кожи, что приводит к нелинейности распределения перемещений в исследуемом диапазоне давлений, расчетная схема представлялась в виде имеющей начальный (полученный экспериментально при величине давления 150 мм рт. ст.) изгиб осесимметричной плиты, находящейся под действием распределенной осесимметричной нагрузки на круге радиусом 15 мм. Такой подход позволяет исключить из рассмотрения подкожные ткани, так как их влияние уже учтено.

*Расчетная схема.* Рассмотрим участок кожи в виде плиты, толщиной 2 мм. Материал плиты однородный, изотропный, следующий закону Гука, с приведенным модулем упругости  $E_{пр1} = 0.01$  МПа. По контуру запрещаются перемещения по осям  $x, y, z$ . К поверхности плиты приложена распределенная осесимметричная нагрузка  $p$ .

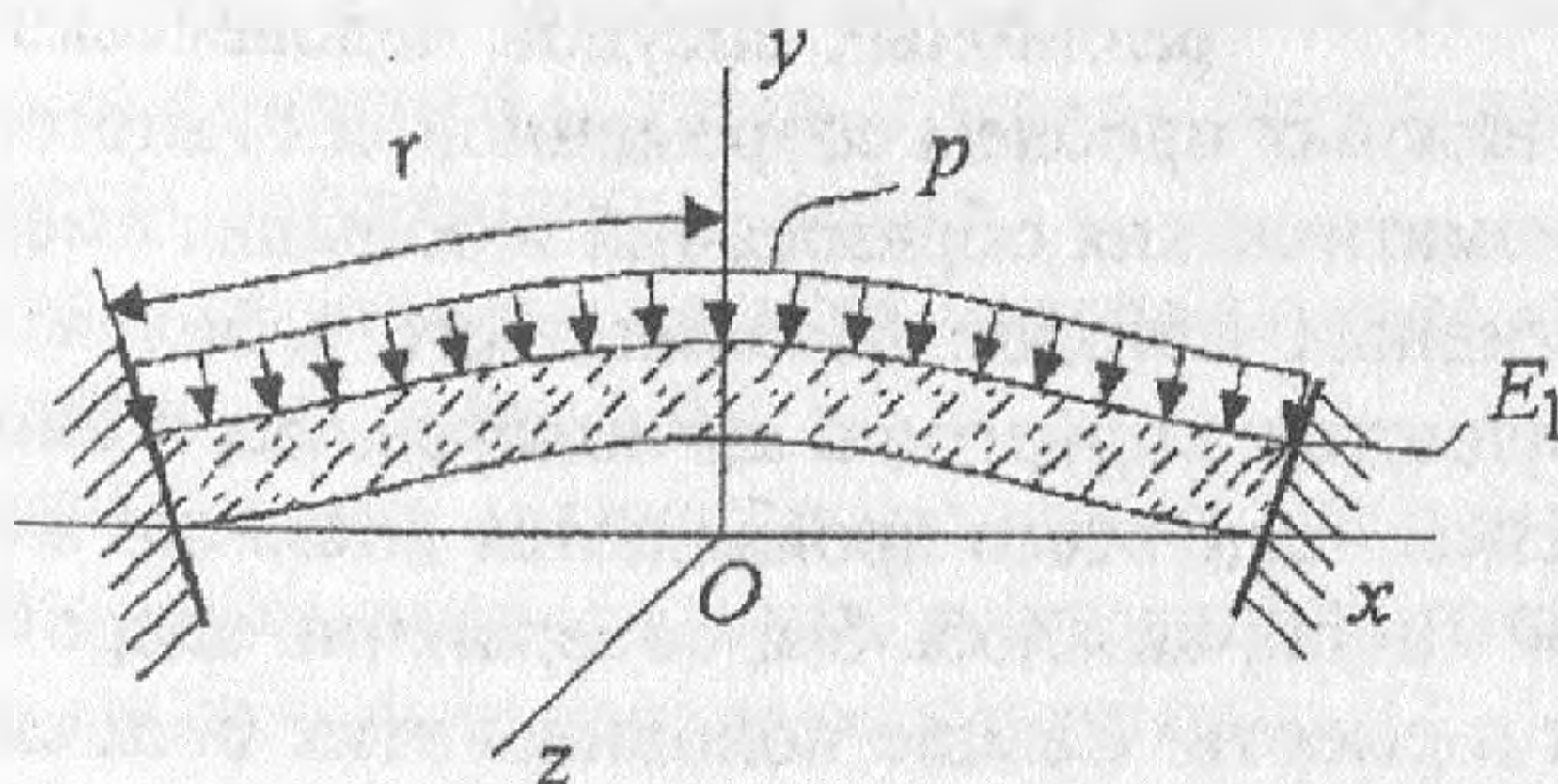


Рис. 1. Расчетная схема для определения деформированного состояния слоя кожи.

Результаты расчета перемещений в диапазоне прикладываемых давлений от 200 до 300 мм рт. ст. представлены на рис. 2.



Рис. 2. Распределение вертикальных перемещений  $\Delta h$  слоя кожи при различных величинах отрицательного давления. I – 300 мм рт. ст., II – 250 мм рт. ст., III – 200 мм рт. ст.

Построенная, на основе описанной расчетной схемы, модель изменения транскапиллярного обмена позволила рассчитать минутный объем плазмы, выходящей из капилляров при воздействии на кожу отрицательным давлением.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать специализированный аппаратный комплекс для исследования проницаемости кожных капилляров, успешное применение которого дало возможность улучшить качество диагностики недостаточности кровообращения у больных облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей, определения уровня ампутации при критической ишемии. Использование комплекса в сочетании с туберкулиновыми кожными пробами позволило повысить эффективность диагностики туберкулеза и определить его активность.

## 2. Моделирование напряженно-деформированного состояния в аневризматических образованиях сердечно-сосудистой системы

Лечение аневризм различных сосудов человеческого организма является одной из актуальных и важных проблем современной сосудистой хирургии [10]. Тяжелые последствия аневризматических образований и большая смертность требуют разработки наиболее эффективных методов лечения этого заболевания при концентрации усилий как врачей - сосудистых хирургов и ангиологов, так и биомехаников.

Клинически аневризмы чаще всего проявляются внезапно и остро в виде внутриполостных кровоизлияний. Люди, казалось бы, совершенно здоровые неожиданно оказываются на грани жизни и смерти. Свыше половины этих больных погибает после первого кровоизлияния, а оставшиеся в живых живут под страхом повторных кровоизлияний.

Одной из важных задач для построения системы предоперационной диагностики является анализ критического состояния аневризмы. В основе этого анализа лежит исследование напряженно-деформированного состояния аневризматического образования.

Нами были построены математические модели для исследования напряженно-деформированного состояния аневризм мешчатого типа различной формы, рассматриваемые как гибкие непологие неосесимметричные оболочки. При построении расчетной схемы (рис. 3) были введены следующие основные допущения.

1. Основание, "ножка", аневризмы имеет жесткое закрепление относительно сосуда, на котором она расположена.
2. Купол аневризмы осесимметричен.
3. Стенка аневризмы рассматривается как однослойная.

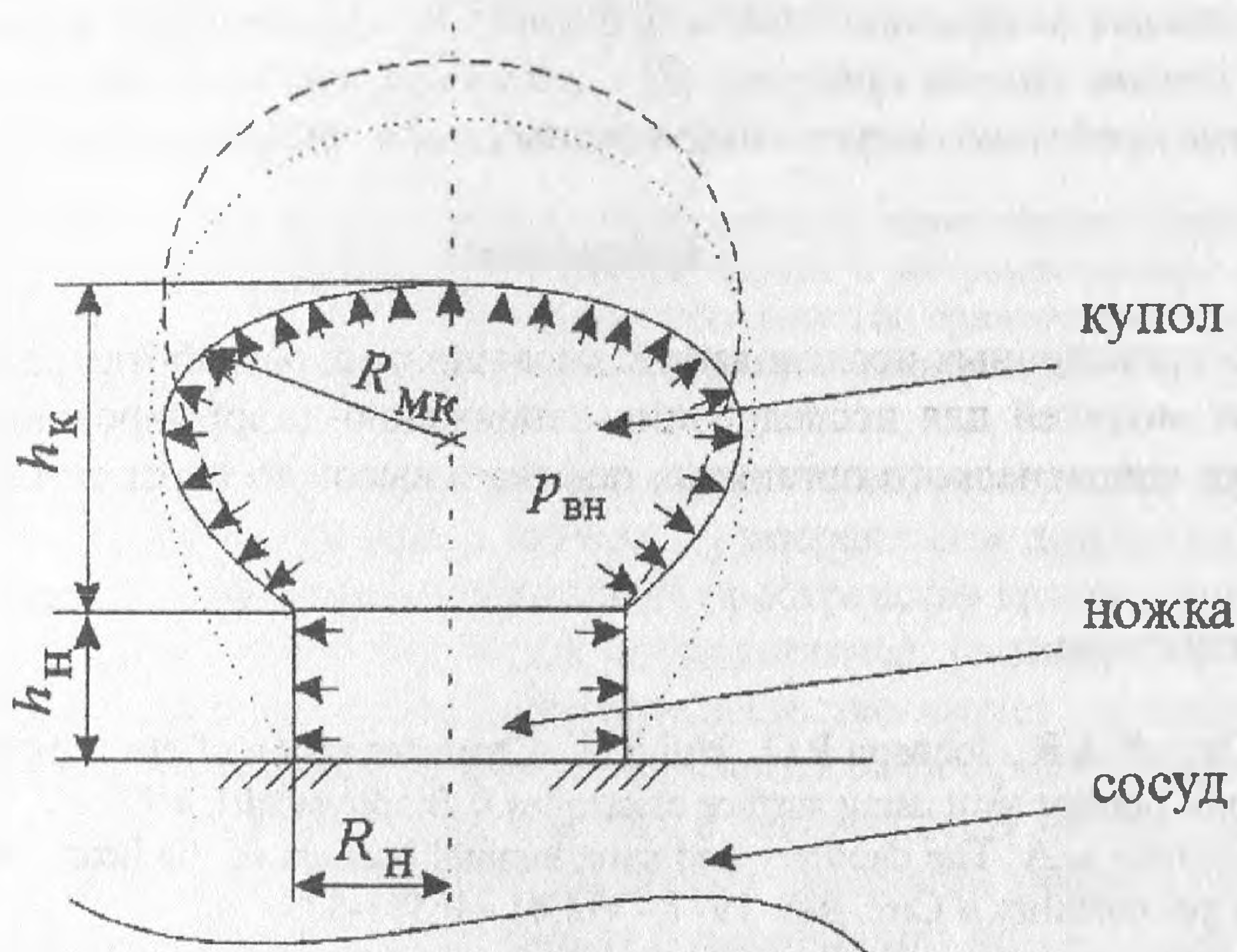


Рис. 3. Расчетная схема аневризмы мешчатого типа.  $R_H$  – радиус ножки аневризмы,  $h_H$  – высота ножки аневризмы,  $h_K$  – высота купола аневризмы,  $R_{МК}$  – радиус меридиана кривизны купола аневризмы.

В соответствии с расчетной схемой в пакете Cosmos создавалась геометрическая модель аневризмы. Конечно-элементная модель строилась при разбиении геометрической модели на 924 тонко-оболочечных элемента. При варьировании основных параметров гемодинамики и анатомических особенностей, позволившем учитывать комплекс сопутствующих заболеваний системной гемодинамики, таких как атеросклероз и гипертония, были проведены исследования напряженно-деформированного состояния аневризм сосудов мозга, коронарной артерии и аорты; определены критические размеры аневризм при различном состоянии организма.

На рис. 4 представлены результаты расчета максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$  в стенке аневризмы сонной артерии толщиной  $\Delta h_{ст}$ .

Проведение ретроспективного анализа полученных результатов с использованием рентгенологических данных реальных больных подтвердило адекватность построенных моделей и полученных с их использованием результатов.

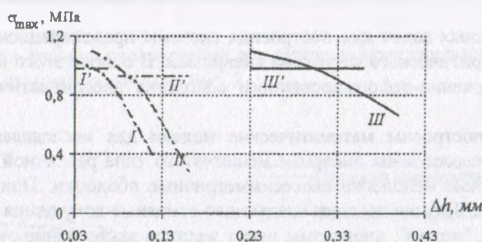


Рис. 4. Графики зависимости напряжений в стенке аневризмы от ее толщины. I – максимальные напряжения в стенке аневризмы позвоночной артерии; I' – уровень предельно допустимых напряжений в стенке позвоночной артерии; II – максимальные напряжения в стенке аневризмы сонной артерии; II' – уровень предельно допустимых напряжений в стенке сонной артерии; III – максимальные напряжения в стенке аорты; III' – уровень предельно допустимых напряжений в стенке аорты.

### Заключение

Результаты проведенных исследований, посвященных разработке расчетных схем и математических моделей для исследования напряженно-деформированного состояния гибких структур человеческого организма показало высокую перспективность данного направления.

### Список литературы

1. Gallo S.A., Oseroff A.R., Johnson P.G., Hui S.W. Characterization of electric-pulse-induced permeabilization of porcine skin using surface electrodes. // Biophysical J. 1997. - V.72. - P.2805-2811.
2. Rose C.P., Goresky C.A. The capillary and sarcolemmal barriers in the heart: An exploration of labeled water permeability. // Circ. Res. 1977. - Vol.41. - P.515-533.
3. Methods in biotechnology, vol. 7: Affinity biosensors: techniques and protocols, edited by K.R. Roger and A. Mulchandani. Totowa, NJ: Humana, 1998, 249 pp.
4. Jacquez J.A. Compartmental analysis in biology and medicine, 3<sup>rd</sup> ed. Ann Arbor, MI: Biomed-Ware, 1996.
5. Патент 2080816 Россия, МКИ<sup>3</sup> 6 А 61 В 5/00, G01 N 33/483. Способ определения проницаемости капилляров кожи / Д.Н.Афонин, Н.А.Гордеев, П.Н.Афонин, Е.И.Игнатьев (Россия) №93027114/14; Заяв. 12.05.93; Опубл. 10.06.97. Бюл. N16.
6. Баллюзек Ф.В., Афонин Д.Н., Добрынин Е.В., Афонин П.Н. Способ определения проницаемости кожных капилляров // Медицинская техника - 1997. - № 6 - С. 30-33.
7. Афонин П.Н., Бегун П.И. Моделирование гибких структур человеческого организма // Известия ГЭТУ. Вопросы исследования и моделирования электронных приборов. 1998. - Выпуск 516. - С. 64-68.
8. Afonin D.N., Gordeev N.A., Afonin P.N. Prognostic significance of skin capillary permeability measurements in patients with terminal extremity ischemia // Biomedical Engineering. - 1995. - Vol. 29, N 4. - P. 194-195.
9. Афонин П.Н., Афонин Д.Н., Бегун П.И., Пахарьков Г.Н. Исследование проницаемости кожных капилляров импедансометрическим методом. // Тезисы докладов II Съезда биофизиков России, Москва, 23-27 августа 1999 г. - М., 1999. - Т.2. - С. 642-643
10. Бегун П.И., Афонин П.Н., Афонин Д.Н., Абдель Хади М. Перспективы разработки методов диагностики поведения стенок кровеносного сосуда в ответ на хирургическое вмешательство // Тезисы международной научно-практической конференции "Измерительные информационные технологии и приборы в охране здоровья – 99", Санкт-Петербург, 29 июня-1 июля 1999 г. - СПб., 1999. - С. 13-14.