

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
 ДИАГНОСТИКИ АРТЕРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

1 2 3

Кузьминский Ю. Г., Шилько С. В., Аничкин В. В., Бондаренко А. Е.

1

«Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ»,

2

Учреждение образования

«Гомельский государственный медицинский университет»,

3

Учреждение образования

«Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»,

г. Гомель, Республика Беларусь

**Введение**

К широко используемым в клинической практике и доступным для измерения характеристикам состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) относятся измеряемые антропологические (возраст, рост, вес), физические (нагрузка) и гемодинамические параметры (частота сердечных сокращений (ЧСС), верхнее и нижнее пульсовое давление) [1, 2]. Для принятия кардиологом решения о тактике лечения сердечно-сосудистых заболеваний весьма полезна дополнительная информация о содержании гемоглобина *Hb*, показателе кислотного равновесия *pH*, кинематической вязкости крови  $\rho$ , содержании адреналина, начальной деформации и модуле упругости стенок сосудов *Ed*, скорости распространения пульсовой волны *Cv* и др. К сожалению, в настоящее время перечисленные параметры определяются инвазивными, сложными и дорогостоящими лабораторными методами.

**Целью** работы является создание неинвазивного метода диагностики гемодинамики на основе биомеханического моделирования течения крови, как вязкой жидкости, в эластичных сосудах. Разработанная авторами гемодинамическая модель включает базу опорных данных и интерфейс, показанный на рисунке 1.



Рисунок 1 — Вид листа интерфейса «Диагностика»

Программное обеспечение моделирования состоит из следующих процедур:

- 1. Анализ.** Задаются: антропометрия, ЧСС, максимальное и минимальное давления. Параметры и отклонения значений основных параметров от статистических норм являются расчетными.
- 2. Мониторинг.** Задаются: вес, нагрузка, ЧСС, максимальное и минимальное давления. Задается номер опорной записи из архива. Выводятся отклонения основных параметров от нормированных значений, содержащихся в опорной записи.
- 3. Статистический прогноз.** Задаются вес пациента, физическая нагрузка и номер опорной записи из архива. По накопленным статистическим данным определяются ЧСС и давления. Аналогично мониторингу определяются остальные параметры.

4. **Индивидуальный прогноз.** Задаются вес пациента, физическая нагрузка и номер опорной записи из архива. Дополнительно задаются нагрузка, ЧСС и давления при дополнительном обследовании системы кровообращения при измененной нагрузке.

Аналогично мониторингу определяются остальные параметры.

5. **Диагностика.** Дополнительно задаются вес пациента, физическая нагрузка, ЧСС, максимальное и минимальное давления и номер опорной записи из архива с параметрами, соответствующими хорошему самочувствию пациента. Производится запись отклонения от нормы расчетного максимального давления в состоянии покоя (*гипертония/гипотония*); отклонения текущей ЧСС от прогнозируемой (*тахикардия/брадикардия*); отклонение текущего максимального давления от прогнозируемого значения (*сердечная недостаточность*); степень порока аортального клапана, измеряемая в % площади сечения аорты, исходя из степени тахикардии [4]. При прогнозируемом систолическом объеме крови в покое, превышающем норму в 1,5 раза, указывается признак спортивного типа системы кровообращения.

*Статистический прогноз* ЧСС, давлений при нагрузке  $W_y$  по данным замера ЧСС, давлений при нагрузке  $W_x$  по формулам (1, 2, 3) с коэффициентами, установленными авторами при замерах у студентов Гомельского госуниверситета:

$$N^y = N^x + 1 \cdot (W^y - W^x), \quad (1)$$

$$p_{\max}^y = p_{\max}^x + 0,5 \cdot (W_y - W_x), \quad (2)$$

$$p_{\min}^y = p_{\min}^x + 0,1 \cdot (W_y - W_x), \quad (3)$$

*Стеноз коронарных артерий* с параметром  $kdah = S_o / S_{ah}$ , показывающим соотношение площадей просвета и общего поперечного сечения коронарной артерии, приводит к снижению исходного коронарного давления  $p_s$  на величину  $\Delta p$ , равную местному сопротивлению на внезапном сужении и внезапном расширении коронарной артерии (рисунок 2). Это местное сопротивление зависит от объемной скорости течения в артерии.

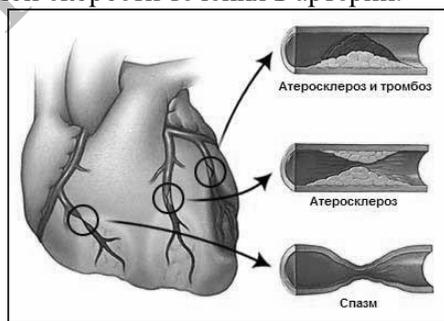


Рисунок 2 — Схема коронарных артерий сердца и их дефектов

Снижение давления приводит к изменению градиента давления в артериальной части коронарной системы кровообращения с сопутствующим снижением объемной скорости течения в системе в пропорции  $kdqh = qdh / q_0$  и ухудшением кровоснабжения сердца, обычно потребляющего около 5 % общего кровотока в течение диастолического периода. Для вычисления потерь давления в стенозированной части сосуда применима формула (4):

$$\left( \begin{array}{c} kdqh \cdot V_m \\ |0,05 \quad \quad | \\ 0 \end{array} \right)$$

$$\Delta p(k_{dah}, k_{dqh}) = 21g \cdot \rho \rho_{br} \cdot \left[ n_{ak} \cdot 8 \cdot 60^4 \right] \cdot 162 \left( \left| k_{dah}^2 (1 - k_{dah}) + \left| \frac{k_{1dah} - 1}{2} \right| \right| \right), \quad (4)$$

$$(d_{ak} \cdot k_{dl}(p_s)) \pi \cdot 2 \cdot l$$

где используются: диаметр коронарной артерии  $d_{ak}$ , число моделируемых артерий  $n_{ak}$ , минутный объем крови  $Vm$ , плотность крови  $\rho b$  и ртути  $\rho r$ .

При заданном параметре  $k_{dah}$  искомый коэффициент потерь коронарного кровотока в отдельной артерии  $k_{dqh}$  определяется из уравнения:

$$\Delta p(k_{dah}, k_{dqh}) + p_{kmin} + Fp_{psl} \left( \left| \frac{n_{ak} \cdot d_{ak} \cdot k_{dl}(p_s)}{l_{ak}} \right| - p_s \right) = 0,$$

где используются: функции определения потерь давления при обычном течении крови в сосудах  $Fp_{psl}$  и изменения диаметров сосудов под давлением  $k_{dl}$ ,  $p_s$  — минимальное давление в артериальной части коронарной системы, предшествующей ее венозной части.

*Идентификация модели кровообращения* с поиском значений неизвестных параметров исходя из значительно меньшего числа входных параметров относится к области некорректных задач. Основным инструментом решения некорректных задач является применение оптимизационных методов, позволяющих минимизировать отклонения (невязки) расчетных и известных значений кон-

трольных параметров [3, 4]. В настоящей работе рассматриваются два списка параметров, невязки которых минимизируются:

1. Минимальное (диастолическое)  $p_{min}$  в артериолах и максимальное (систолическое) давление  $p_{max}$  в артериях, для которых контрольными являются исходные значения указанных давлений; 2. Искомые параметры (систолический объем, содержание гемоглобина, уровень стресса, параметр кислотного равновесия, вязкость крови, эластичность стенок сосудов, коэффициент деформации сосудов).

*Верификация* решений некорректных задач выполняема только на основе сопоставления расчетных и измеренных контрольных параметров [7]. Первый способ заключался в сопоставлении расчетных результатов (рисунок 3а) с заданными значениями лабораторно измеряемых параметров (вязкость крови, содержание гемоглобина, параметр кислотного равновесия, скорость распространения пульсовой волны). В соответствии со вторым способом для 75 студентов факультета спортивной медицины Гомельского государственного университета, включая спортсменов-разрядников и призеров международных соревнований, были собраны значения входных параметров в покое и при средней тренировочной нагрузке. Обсуждение результатов (рисунок 3в) со специалистами спортивной медицины не выявило противоречий по оценке состояния обследуемых и позволило сделать ряд выводов:

- статистика изменений при физической нагрузке 45  $кДж/мин$  в сравнении с положением покоя показывает, что ударный объем изменился с 0,085 до 0,126 л;  $pH$  с 7,37 до 7,27; вязкость с 4,7 до 2,9  $сСт$ ; уровень стрессовой нагрузки с 0,99 до 1,01; скорость пульсовой волны с 457 до 533  $см/с$ ; коэффициент деформации сосудов с 0,995 до 0,985; коэффициент дилатации с 1,213 до 1,163;
- увеличение нагрузки на 1  $кДж/мин$  в среднем дает рост ЧСС на 1 ед., максимального давления на 0,5  $мм рт. ст.$  и минимального давления на 0,1  $мм рт. ст.$
- анализ уровня подготовки спортсменов потребовал использования специальных коэффициентов: индексов Руфье-Диксона и Кердо, среднего давления, коэффициентов экономичности кровообращения и выносливости по Квасу.

Применение модели в учебном процессе подготовки медиков позволяет продемонстрировать корреляцию параметров сердечно-сосудистой системы (рисунок 3б).

ФИО	Кузьминский ЮГ		
Год рождения	1949		
Пол			
Рост см	170		
Вес кг	79		
Дата	16.02.09		
Возраст	60		
Нагрузка к/Дж	6		
Частота сердечных сокращений уд/мин	72		
Максимальное давление мм рт ст	145		
Минимальное давление мм рт ст	90		
Объем крови л	4,3	4,3	
Минутный объем крови л	7,3	7,6	
Систольный объем л	0,101	0,105	0,127
pH-параметр	7,36	7,36	0,001
Содержание гемоглобина г/л	135	130	0,000
Кинематическая вязкость сСт	5,9	5,7	0,213
Уровень стресса	0,97	0,97	0,030
Эластичность сосудов x104 Па	16,3	16,3	0,015
Скорость волны см/сек	802	802	
Сжатие/расширение сосудов d1/d0	1,050	1,050	0,050
Дилатация сосудов dp/d0	1,084	1,084	

а) сопоставление результатов анализа с использованием лабораторного и нормативного содержания гемоглобина

ФИО	Кузьминский ЮГ			
Год рождения	1949			
Пол				
Рост см	170			
Вес кг	79			
Дата	16.02.09			
Возраст	60			
Нагрузка к/Дж	6			
Частота сердечных сокращений уд/мин	72			
Максимальное давление мм рт ст	145	145	145	135 155
Минимальное давление мм рт ст	80	100	90	90 90
Объем крови л	4,3			
Минутный объем крови л	7,6			
Систольный объем л	0,105			
pH-параметр	7,37	7,37	7,36	7,37 7,37
Содержание гемоглобина г/л	130			
Кинематическая вязкость сСт	5,5	5,3	5,7	5,0 5,7
Уровень стресса	1,06	1,09	0,97	0,98 1,12
Эластичность сосудов x104 Па	16,4	23,3	16,3	16,2 23,1
Скорость волны см/сек	824	919	802	776 960
Сжатие/расширение сосудов d1/d0	1,024	1,096	1,050	1,084 1,046
Дилатация сосудов dp/d0	1,071	1,069	1,084	1,088 1,059

б) сопоставление результатов анализа с варьированием максимального и минимального давлений

Номер карты	ФИО	Год рождения	Пол	Рост см	Вес кг	Дата	Возраст	Частота сердечных сокращений уд/мин	Максимальное давление мм рт ст	Минимальное давление мм рт ст	Объем крови л	Минутный объем крови л	Систольный объем л	Содержание гемоглобина г/л	Кинематическая вязкость сСт	Уровень стресса	Эластичность сосудов x104 Па	Скорость волны см/сек	Сжатие/расширение сосудов d1/d0	Дилатация сосудов dp/d0	Неделя беременности	Неделя гестации	Уровень гемоглобина	Уровень гемоглобина	Потребный О <sub>2</sub>	Объем гемоглобина л	Тест Рубин-Джексона	Испытание Курно	Среднее давление	Коэф. эластичности хря образований	Коэф. эластичности Класс		
ГОКД-1	1959	Ж	178	97	25.02.09	50	6	81	161	89	5,2	8,5	0,104	7,35	135	6,2	1,13	24,9	980	1,026	1,055	2,85	0,44	72	22,7%	369	8,9	-9,9	125	5832	11,3		
				87				45	120	181	93	5,2	18,2	0,152	7,23	135	3,4	1,12	19,2	883	1,000	1,070	2,92	0,29	88	81,6%	2768	26,6	8,2	22,6	137	10512	13,7
				87				60	135	188	94	5,2	20,5	0,152	7,25	136	3,2	1,12	19,5	875	0,990	1,073	1,63	0,34	94	96,6%	3691	29	9,7	30,1	141	12636	14,4
ГОКД-2	1959	С	179	101	25.02.09	50	6	94	181	111	6,1	10,7	0,114	7,49	159	6,9	0,98	24,0	904	1,050	1,080	0,92	0,18	70	17,7%	429	10	-18,1	146	6580	13,4		
				101				45	133	201	115	6,1	22,0	0,165	7,33	161	3,8	1,12	19,1	827	1,024	1,098	2,15	0,44	86	66,0%	3214	31	12,1	13,6	158	11385	15,5
				101				60	148	208	116	6,1	24,4	0,165	7,33	157	3,5	1,12	26,7	978	1,026	1,072	0,58	0,39	92	81,3%	4285	33	13,6	21,4	162	13557	16,2
МС Рыбак	1988		184	84	09.03.09	21	6	72	120	80	5,0	7,0	0,098	7,34	150	6,9	1,00	5,2	455	1,010	1,211	2,51	0,11	40	23,9%	356	8,6	-11,1	100	2880	18,0		
				84				45	112	140	80	5,0	15,9	0,142	7,23	150	3,6	1,00	5,9	479	0,956	1,192	2,09	0,09	60	81,6%	2673	26	5,6	28,6	110	6720	18,7
				84				60	127	148	80	5,0	18,1	0,142	7,25	149	3,2	1,00	7,0	548	0,976	1,152	1,61	0,43	68	96,6%	3564	28	7,1	37,2	114	8623	18,8
МС Пристронов	1988		172	62	06.03.09	21	6	48	120	60	3,4	4,7	0,099	7,44	164	7,4	0,97	3,2	419	0,942	1,199	2,64	0,66	60	23,9%	263	6,3	-25,0	90	2880	8,0		
				62				45	114	130	70	3,4	16,3	0,143	7,41	163	2,1	0,97	5,3	526	0,956	1,141	2,36	0,70	60	53,6%	1973	19	1,0	38,6	100	6840	19,0
				62				60	139	134	74	3,4	20,0	0,143	7,45	164	1,8	0,97	5,1	515	0,956	1,154	2,77	0,68	60	58,2%	2631	21	3,5	47,0	104	8363	23,2
б/р Андриевская	1988	Ж	158	55	06.03.09	21	6	76	80	40	3,0	5,7	0,075	7,44	119	3,4	0,96	1,7	326	0,933	1,221	2,74	0,62	40	23,9%	233	5,6	47,4	60	3040	19,0		
				55				45	128	120	60	3,0	14,0	0,110	7,27	120	1,8	0,96	4,1	495	0,952	1,137	2,76	1,51	60	75,4%	1750	17	8,0	53,1	90	7680	21,3
				55				60	148	135	68	3,0	16,2	0,110	7,29	117	1,8	0,96	4,4	512	0,952	1,146	1,88	1,68	68	89,0%	2334	18	10,0	54,3	102	10018	21,9

в) архивные данные пациентов кардиодиспансера и студентов спортсменов

Рисунок 3 — Результаты биомеханической диагностики

Среди параметров биохимического анализа крови наиболее существенными являются содержание гемоглобина и кислотное равновесие, влияние которых изложено выше. Особенно заметно изменяется pH при изменении физической нагрузки [5]. Перспективным является переход от уровня стрессовой нагрузки к содержанию адреналина, которое изменяется наиболее быстро. Увеличение ЧСС с повышением содержания адреналина известно из наблюдений, также как и снижение выносливости пациентов с высокой подверженностью стрессам [6]. Помимо учитываемых воздействий адреналина на вязкость крови и число активированных сфинктеров, для повышения точности биомеханического моделирования важно найти зависимость, учитывающую величину реализуемой человеком физической нагрузки от содержания адреналина. **Заключение**

Использование разработанной биомеханической модели артериальной части системы кровообращения и соответствующее программное обеспечение дополняет традиционно используемые в медицинской практике инструментальные методы диагностики состояния сердечнососудистой системы. Это позволяет получить полезную информацию о причинах патологии сердца и сосудов, прогнозировать результаты протезирования в кардиохирургии, а также выявить адаптивные возможности сердечно-сосудистой системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский, В. И. Биомеханика / В. И. Дубровский, В. Н. Федорова. — М.: Медицина, 2003. — 669 с.
2. Методика и компьютерная система диагностики состояния сердечно-сосудистой системы / Ю. Г. Кузьминский [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. — 2009. — № 2. — С. 90–96.
3. Савицкий, Н. Н. Биофизические основы кровообращения и клинические методы изучения гемодинамики / Н. Н. Савицкий. — Л.: Медицина, 1963. — 403 с.
4. Сидоренко, Г. И. Инструментальные методы исследования в кардиологии / Г. И. Сидоренко [и др.]; под ред. Г. И. Сидоренко. — Мн., 1994. — 272 с.
5. Сумин, А. Н. Стресс-реактивность гемодинамики у подростков и факторы ее определяющие / А. Н. Сумин, Л. Ю. Сумина, Н. Д. Васильева // Артериальная гипертензия. — 2008. — Т. 14, № 1. — С. 165–171.

6. *Шилько, С. В.* Моделирование гидродинамического трения: аналогия системы кровообращения и трубопроводного транспорта нефти / С. В. Шилько, Ю. Г. Кузьминский // Совр. инф. и телеком. технол. для здравоохран.: матер. 2 междунар. конф. — Мн., 2008. — С. 338–343.
7. *Gültekin, Z.* Hemodynamic and lactic acid responses to proprioceptive neuromuscular facilitation exercise / Z. Gültekin, A. Kin-Isler, Ö. Sürenkök // Journal of Sports Science and Medicine. — 2006. — № 5. — P. 375–380.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ