

Разработка температурной модели дистальных фаланг пальцев пригодной для оценки артериального давления

В.М. Строев, А.И. Истомина, А.Ю. Волков

Тамбовский Государственный Технический Университет, Тамбов

Аннотация: В настоящее время наблюдается тенденция к разработке неманжетных способов измерения артериального давления, что позволяет уменьшить дискомфорт при измерении и обеспечить непрерывный контроль за артериальным давлением. Предложенная модель позволяет оценить температуру дистальных фаланг пальцев (ДФП) и, соответственно, уровень артериального давления, как в стационарных условиях, так и во время переходных процессов. В результате экспериментальной проверки модели доказано, что усредненное значение температуры ДФП повторяет закон изменения среднего артериального давления, а переходные процессы изменения температуры ДФП при изменении артериального давления и температуры окружающей среды независимы и подчиняются экспоненциальному закону.

Ключевые слова: контроль, артериальное давление, температура, дистальные фаланги пальцев, кровь, окружающая среда.

Введение

Артериальная гипертензия является одним из самых распространенных заболеваний во всем мире. Повышение давления приводит к развитию сердечно-сосудистых заболеваний, нарушению мозгового кровообращения, поражению сосудов ног. Для больных артериальной гипертензией крайне важен постоянный контроль артериального давления, который не всегда возможен вне стационарных условий. Регулярный контроль артериального давления у людей, страдающих артериальной гипертензией, позволяет снизить уровень смертности от инсульта головного мозга на 48%.

Современное состояние

В настоящее время наблюдается тенденция к разработке неманжетных способов измерения артериального давления, что позволяет уменьшить дискомфорт при измерении и обеспечить непрерывный контроль за артериальным давлением. Известно устройство для безманжетного измерения артериального давления и частоты пульса [1] в корпусе по форме авторучки. Данный метод находится на стадии разработки.

Также разрабатывается метод измерения величины артериального давления по таким показателям работы системы кровообращения, как время распространения пульсовой волны, частота сердечных сокращений, параметры variability сердечного ритма, продолжительность систолических интервалов [2].

В [3] рассматривается модель для нейросети, которую предполагается использовать для измерения систолического и диастолического давления с помощью фотоплетизмографа. Недостатком данного направления является постоянное облучение крови инфракрасными излучателями. Считается, что облучение при диагностике не оказывает заметного влияния на объект воздействия [4]. Но в настоящее время не достаточно исследовано продолжительное многолетнее воздействие такого измерителя для выявления случаев, когда пациент не воспринимает резких изменений артериального давления.

В данной статье мы остановимся на разработке модели температуры дистальных фаланг пальцев для тепловых методов контроля артериального давления.

Разработка предлагаемой модели

Для оценки эффективности существующих методов были проанализированы температурные модели для дистальных фаланг пальцев.

Наличие тесной взаимосвязи температуры дистальных фаланг пальцев с кровенаполнением подтверждается результатами исследований [5].

На рис. 1 представлена температурная модель дистальных фаланг пальцев, основными компонентами которой являются кожный покров, подкожные кровеносные сосуды и окружающий воздух [6]. Введем следующие обозначения: T_{air} – температура окружающей среды, T – температура дистальных фаланг пальцев, q – уровень теплоотдачи, L – толщина кожи, T_b – температура глубинных слоев, в которых находятся

кровеносные сосуды. Кроме того кожа характеризуется такими параметрами, как температуропроводность (λ) и коэффициент теплоотдачи (α).

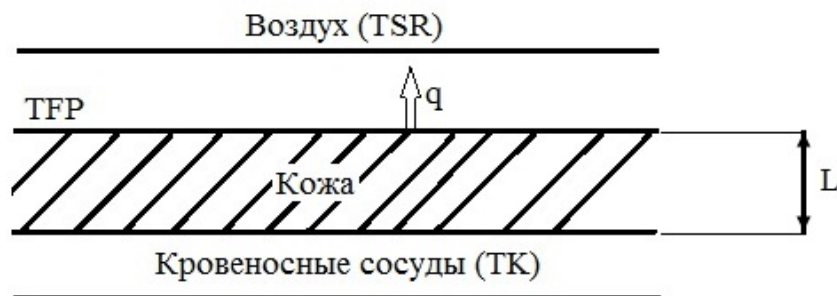


Рис. 1. – Температурная модель дистальных фаланг пальцев.

В стационарных условиях равновесия данная модель описывается следующим выражением [7]:

$$\alpha(T - T_{air}) = \beta(T_b - T), \quad (1)$$

где $\beta = \frac{\lambda}{L}$.

Модель А. Shitzera [8] описывается уравнением

$$BF(t) = \frac{\rho \cdot c_s \cdot \frac{dT(t)}{dt} + \alpha \cdot (T(t) - T_{air})}{\rho_b \cdot c_b \cdot (T_b - T(t))}.$$

где t – время, ρ – плотность ткани, ρ_b – плотность крови, c_s – удельная теплоёмкость биоткани, c_b – удельная теплоёмкость крови, S – площадь пальца, T_{kr} – температура крови, T_{air} – температура воздуха, $T(t)$ – температура поверхности кожи, BF – объемный кровоток, α – коэффициент теплоотдачи.

Данная модель не учитывает толщину слоя кожи, поэтому влияние температуры окружающей среды в данной модели сводится к минимуму. Кроме того трудно с необходимой точностью определить реальные значения входящих в модель параметров.

Также известна модель, в которой зависимость температуры дистальных фаланг пальцев от артериального давления в переходной период определяется уравнением [9]

$$\frac{dT(t)}{dt} = C_1(P - P^*) + C_2(T^* - T), \quad (2)$$

где T – температура концевой фаланги пальца кисти, C_1 – интенсивность изменения температуры за счет изменения уровня артериального давления, P – текущее артериальное давление, P^* – стационарное артериальное давление, C_2 – интенсивность нормализации уровня температуры, T^* – стационарная температура концевой фаланги пальца кисти.

На основе первых двух предыдущих моделей была разработана усовершенствованная модель (3). В формуле Шитцера правая часть, описывающую стационарное состояние дистальных фаланг пальцев, заменена на выражение первой модели, а левая часть записана с обобщенным параметром γ . Таким образом, полученная модель совмещает свойства первой и второй модели.

$$\gamma \cdot \frac{dT}{dt} = \beta \cdot (T_b - T) - \alpha(T - T_{air}) = -(\beta + \alpha) \cdot T + \beta \cdot T_b + \alpha \cdot T_{air}, \quad (3)$$

где температура глубинных слоев связана с температурой крови через коэффициент пропорциональности b , который в свою очередь определяется кровенаполнением глубинного слоя и уровнем артериального давления P , т.е.

$$T_b = b(P) \cdot T_{kr} = C_0 \cdot P.$$

Из выражения (1) выразим стационарное значение температуры дистальных фаланг пальцев

$$T^* = \frac{\beta \cdot T_b^* + \alpha \cdot T_{air}^*}{(\alpha + \beta)},$$

Где T_b^* – температура глубинных слоев, в которых находятся кровеносные сосуды, в стационарных условиях, поэтому определим, что $T_b^* = b^* \cdot T_{kr}$.

К значению T в выражение (3) добавим T^* и вычтем значение T^* , полученное по первой модели. Тогда

$$\gamma \cdot \frac{dT}{dt} = -(\alpha + \beta) \cdot (T - T^*) + \beta \cdot (T_b - T_b^*) + \alpha \cdot (T_{air} - T_{air}^*). \quad (4)$$

Данное уравнение (4) можно представить в обобщенном виде:

$$\frac{dT}{dt} = C_1 \cdot (P - P^*) - C_2 \cdot (T - T^*) + C_3 \cdot (T_{air} - T_{air}^*),$$

где C_3 – интенсивность изменения температуры за счет изменения температуры окружающей среды.

Коэффициенты C_1 , C_2 , C_3 определяются опытным путем. C_1 и C_2 – по результатам окклюзионного теста [10], а коэффициент C_3 – по результатам климатического теста. Климатический тест подразумевает определение температур дистальных фаланг пальцев при двух разных температурах окружающей среды, а также определение времени переходного процесса.

Полученная модель соответствует модели терморегуляции, но дополнительно учитывает влияние температуры окружающей среды.

Найдем решение для изменения температуры дистальных фаланг пальцев при скачкообразном изменении давления на ΔP при условии неизменной температуры окружающей среды.

Решением данного уравнения является

$$T(t) = \frac{C_1(P - P^*)}{C_2} (1 - e^{-C_2 t}) + T^*.$$

На рис. 2 изображена зависимость изменения температуры дистальных фаланг пальцев от изменения артериального давления.

Таким образом, после изменения давления на ΔP начинается экспоненциальный переходной процесс изменения температуры ДФП. В результате температура устанавливается на новом уровне $T_n = \frac{C_1}{C_2} \cdot \Delta P + T^*$.

Этот уровень можно использовать для определения артериального давления, поэтому необходимо постоянно осуществлять контроль температуры дистальных фаланг пальцев, выявлять наличие переходных процессов, вычислять новые значения давления в момент окончания переходных процессов.

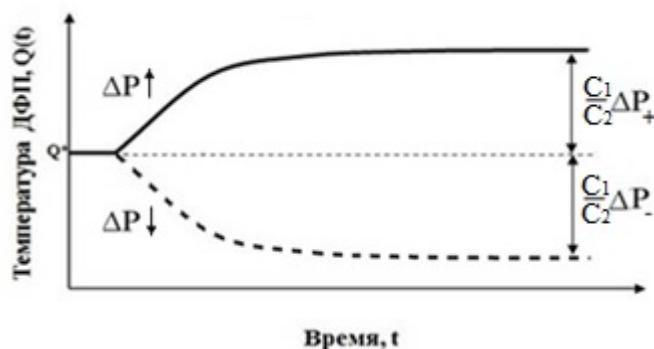
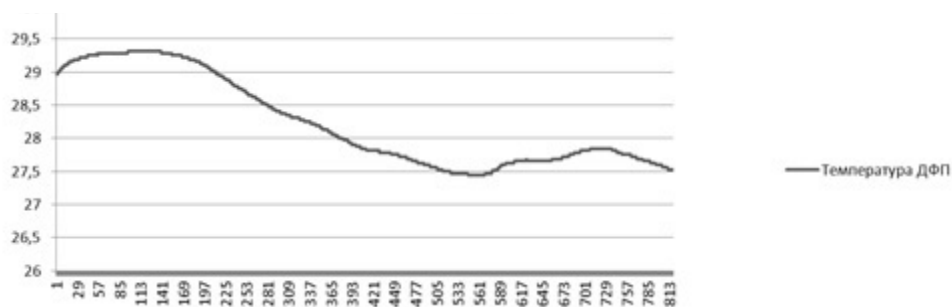


Рис. 2. - Зависимость изменения температуры дистальных фаланг пальцев от изменения артериального давления.

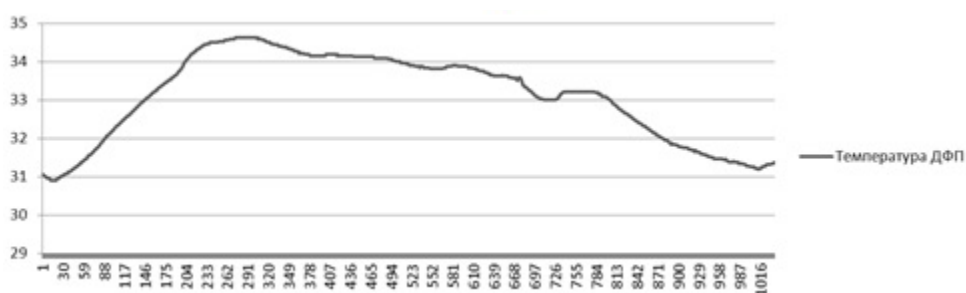
Экспоненциальная зависимость изменения температуры дистальных фаланг пальцев будет характерна как для изменения давления, так и для изменения температуры среды, но скорость переходных процессов для этих двух случаев будет различной.

Полученная модель была проверена опытным путем (рис. 3).

Полученные результаты подтверждают взаимосвязь температуры дистальных фаланг пальцев и артериального давления. Причем, во втором случае у испытуемого фиксировалось увеличение артериального давления и восстановление его уровня в течение 7 минут, что подтвердилось поведением термограммы.



а)



б)

Рис. 3. – Тестовые исследования предполагали отслеживание динамики изменения температуры дистальных фаланг пальцев при а) применении препаратов, понижающих артериальное давление; б) физических нагрузок.

Полученные результаты исследований подтверждают экспоненциальное изменение температуры дистальных фаланг пальцев при скачкообразном изменении артериального давления или температуры окружающей среды, а также возможность использования данного метода для непрерывного контроля артериального давления.

Литература

1. Пат. 2 446 738 Российская Федерация, МПК А61В 5/022. Устройство для безманжетного измерения артериального давления и частоты пульса/ Коршунов В.М.: заявитель и патентообладатель Коршунов Виктор Михайлович - № 2010140940/14; заявл. 06.10.2010; опубл. 10.04.2012.: ил.

2. Антончик О., Джадуэй А., Шульгин В. Алгоритм безманжетной оценки артериального давления на основе метода максимального

правдоподобия // Клиническая информатика и телемедицина: Т.6. –Харьков: УАКМ и Институт МИТ, 2015. С. 63-68.

3. Семенистая Е.В., Максимов А.В. О подходе к построению модели дистальных сосудов пригодной для оценки артериального давления // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 Ч.2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1469

4. Куликова И.В., Малюков С.П., Петерс С.И. Разработка модели взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1999

5. Stikbakke E., Mercer B.J. An Infrared thermographic and Doppler flowmetric investigation of skin perfusion in the forearm and finger tip flowing a short period of vascular stasis // Thermology international. 2008. Vol.18. №3. pp.107-111.

6. Истомина А.И. Мониторинг артериального давления по температурным параметрам дистальных фаланг пальцев / А.И. Истомина, В.М. Строев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.6. Секции 6, 7, 8 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов : Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. С. 145-147.

7. Пат. 1076773 Российская Федерация, МПК G01K7/02. Устройство для определения температуры/ Балашов А.Н., Горемыкин Ю.В., Захаров Ю.П., Чернов В.В.: заявитель и патентообладатель Специализированное конструкторско-технологическое бюро твердотельной электроники с опытным производством Института прикладной физики АН МССР - № 3483998/18-10; заявл. 13.08.1982; опубл. 28.02.1984.: ил.

8. Shitzer A. et al. Lumped-parameter tissue temperature-blood perfusion model of a cold-stressed fingertip // Journal of Appl. Phusiol. 1996. Vol. 80. pp. 1829-1834.

9. Модель процесса биоуправления при мониторинговании кожной температуры/ Российская академия наук сибирское отделение «Автометрия». – 1996, № 6 - Новосибирск: Российская академия наук сибирское отделение, 1996 – Ежемес. С. 26-30 – УДК 577.3: 616.1.

10. Пат. 2405416 Российская Федерация, МПК А61В5/01. Способ диагностики функционального состояния периферических сосудов/ Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Протопопов А.А., Сагайдачный А.А.: заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского" - № 2009117567/14; заявл. 12.05.2009; опубл. 10.12.2010.: ил.

References

1. Patent 2446738 Russian Federation, IPC A61B 5/022. Ustroystvo dlya bezmanzhetnogo izmereniya arterialnogo davleniya i chastoty pulsa. [Not cuff device for measuring blood pressure and pulse rate]. Korshunov VM : заявитель i patentoobladatel. № 2010140940/14; заявлено 06.10.2010; опубликовано 10.04.2012.

2. Antonchuk O. Dzhaduey A. Shulgin B. Klinicheskaya informatika i telemeditsina: Т.6. Kharkov: UAKM i Institut MIT. 2015. pp. 63-68.

3. Semenistaya E.V., Maksimov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1469

4. I.V. Kulikova, S.P. Malukov, S.I. Peters. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1999

5. Stikbakke E., Mercer B.J. Thermology international. 2008. Vol.18. №3. pp.107-111.

6. Istomina A.I., Stroyev V.M. Monitoring arterialnogo davleniya po temperaturnym parametram distalnykh falang paltsev [Blood Pressure Monitoring of temperature parameters of the distal phalanges] Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-27: sbornik trudov XXVII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya: v 12 t. T.6. Seksii 6. 7. 8. pod obshchey redaktsiyey A.A. Bolshakova. Tambov: TGTU. 2014. pp.145-147.

7. Patent 1076773 Russian Federation, IPC G01K7. 02. Ustroystvo dlya opredeleniya temperatury [A device for determining the temperature]. A.N. Balashov, Y.U. Goremykin, Y.P. Zakharov, V.V. Chernov: zayavitel i patentoobladatel Spetsializirovannoye konstruktorsko-tekhnologicheskoye byuro tverdotelnoy elektroniki s opytным proizvodstvom Instituta prikladnoy fiziki AN MSSR. № 3483998/18-10; zayavleno 13.08.1982; opublikovano 28.02.1984. : il.

8. Shitzer A. et al. Journal of Appl. Phusiol. 1996. Vol. 80. pp. 1829-1834.

9. Rossiyskaya akademiya nauk sibirskoye otdeleniye «Avtometriya». 1996. № 6. Novosibirsk: Rossiyskaya akademiya nauk sibirskoye otdeleniye. 1996. Ezhemesechnik. UDK 577.3: 616.1.

10. Patent 2405416 Russian Federation, IPC A61B5. Sposob diagnostiki funktsionalnogo sostoyaniya perifericheskikh sosudov [A method for diagnosing the functional state of peripheral vascular]. D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.A. Protopopov, A.A. Sahaidachny: zayavitel i patentoobladatel Gosudarstvennoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego professionalnogo obrazovaniya "Saratovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.G. Chernyshevskogo". № 2009117567/14; zayavleno 12.05.2009; opublikovano 10.12.2010.