

Г. П. ИТКИН, В. Е. ТОЛПЕКИН, К. Л. МЕЛУЗОВ, Р. М. КУРГИНЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛИЧНЫХ СТЕПЕНЕЙ ОСТРОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ

Отсутствие четких показаний и противопоказаний к применению вспомогательного кровообращения затрудняет ввод данного метода в широкую клиническую практику для лечения больных с острой сердечной недостаточностью. В этих условиях весьма заманчивой представляется возможность математического моделирования сердечно-сосудистой системы, которая исключает методические сложности эксперимента, факторы случайности и дает правильную оценку эффективности метода. В литературе известно большое число математических моделей, описывающих как отдельные, так и связанные звенья системы кровообращения, включающие экстравазкулярные факторы [2—4, 6, 8].

В лаборатории математического и физического моделирования ИТОиТ МЗ СССР разработана математическая модель системы кровообращения при различных степенях сердечной недостаточности. При построении модели мы первоначально изучали воздействия искусственного желудочка сердца (ИЖС) на центральную гемодинамику в условиях острой сердечной недостаточности. Эти вопросы можно рассматривать на относительно простой модели, включающей в себя модели большого и малого кругов кровообращения, правого и левого сердца. С этой целью была разработана и реализована на аналоговой вычислительной машине МН-18 математическая модель, в которой приняты следующие ограничения и допущения:

а) не учитывались быстротекущие процессы гемодинамики, связанные с пульсирующим характером кровотока; б) рассматривались только те процессы, которые включаются в общий гомеостаз в начальный период нарушения сократительной способности миокарда; в) уровень метаболизма в организме принят постоянным; г) система артериальных и венозных сосудов большого и малого круга объединены в соответствующие гипотетические резервуары.

Принятые допущения и ограничения позволили решать поставленные задачи на относительно простой модели, блок-схема которой представлена на рис. 1. Модель описывает замкнутую гемодинамику большого и малого кругов кровообращения, насосную функцию левого и правого сердца, контура управления сосудистым тонусом и сердцем; содержит 19 уравнений 4-порядка с нелинейностями типа ограничений и множителей. В модельном представлении кровь, вытекающая из ле-

вого желудочка и после прохождения по известным магистралям поступает с задержкой в венозный резервуар:

$$Q_b = \frac{1}{T_1 P + 1} \cdot Q,$$

где Q —артериальный кровоток большого круга кровообращения или выброс крови левым сердцем; Q_b —венозный кровоток; T_1 —постоянная времени большого круга кровообращения.

Аналогично будет выражаться и кровоток в малом круге кровообращения:

$$Q_b^m = \frac{1}{T_2 P + 1} \cdot Q_n,$$

где Q_b^m —венозный кровоток малого круга; T_2 —постоянная времени малого круга.

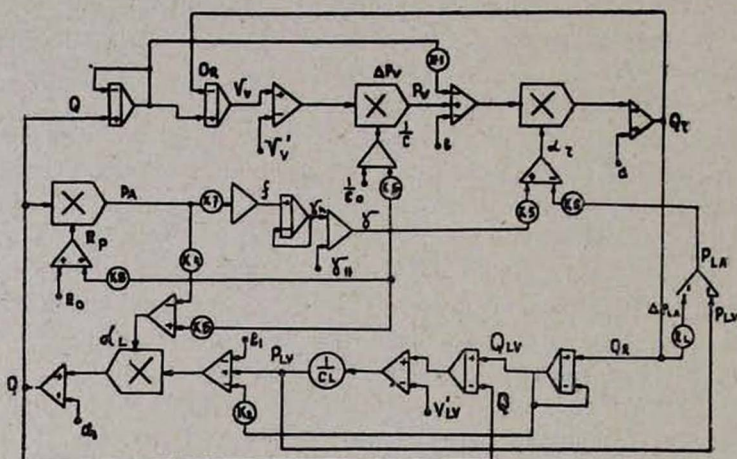


Рис. 1. Блок-схема модели острой сердечной недостаточности.

Поскольку артериальное давление малого круга в 5—6 раз меньше чем в большом круге, то на него существенное влияние оказывает давление в легочных венах и левом предсердии, что можно выразить следующим образом:

$$P_A^m = \Delta P_A^m + P_b^m,$$

где P_A^m —давление в легочной артерии; ΔP_A^m —перепад давления в легочных артериях; P_b^m —давление в легочных венах.

Величина ΔP_A^m —определяется гидравлическим сопротивлением сосудов малого круга кровообращения и легочным кровотоком:

$$\Delta P_A^m = Q_n \cdot R_m,$$

где Q_n — легочный артериальный кровоток; R_m — общее периферическое сопротивление малого круга. В идентичных условиях величину R_m можно принять постоянной.

Левый и правый желудочки выражены линейными функциями с ограничениями вида:

$$Q = L(P_{np} - b) + a,$$

где Q — производительность желудочка; a и b — постоянные коэффициента; P_{np} — давление в предсердии, являющееся функцией венозного давления и притока; L — коэффициент усиления.

Давление в других областях системы кровообращения определялось соответствующими объемами крови и эластичностью сосудов. Коэффициент усиления по каждому желудочку выражался уравнением:

$$L = K_\gamma \cdot \gamma - K_p \cdot P_A,$$

где $\gamma = \gamma_r + \gamma$ — сумма нервных и гуморальных факторов.

P_A — артериальное давление; $K_\gamma \cdot K_p$ — коэффициенты, определяющие сократительную способность сердца.

При этом падение насосной функции моделировалось уменьшением соответствующих коэффициентов K_γ . На модели снимали статические и динамические характеристики системы при изменении K_γ для левого и правого желудочков. Адекватность модели при переводе ее в состояние сердечной недостаточности была подтверждена физиологическими данными и результатами экспериментов на животных с искусственным сердцем.

На модели проведен сравнительный анализ методов управления лево-желудочкового шунтирования, основанных на стабилизации давления в предсердии и пропорциональном управлении. На рис. 2 представлены статические характеристики модели, отражающие зависимость основных переменных.

На модели снимали статические и динамические характеристики системы при изменении коэффициента передачи K_3 между нейрогуморальными факторами управления и сократительной способностью левого и правого сердца в зависимости от типа моделируемой недостаточности. Динамические характеристики, снятые на модели, сравнивались с характеристиками, полученными в экспериментах с искусственным сердцем при мгновенном снижении производительности левого и правого насосов.

Из рис. 2 видно, что при $K_3 \geq 0,6$ сердечный выброс и давление в аорте не изменяются. Однако прогрессивно нарастает давление в левом предсердии и легочной артерии. Эта область (зона I) характеризуется компенсированной недостаточностью левого желудочка. Эта компенсация происходит за счет включения механизма Франка-Старлинга, который обеспечивает необходимый организму кровоток при большом диастолическом наполнении полости левого желудочка.

При дальнейшем уменьшении K_3 от 0,6 до 0,25 сердечный выброс и

давление в аорте начинают постепенно снижаться. Эта область (зона II) характеризуется тем, что рабочая точка на кривой переходит в область насыщения (I) и, таким образом, механизм Франка-Старлинга отключается—при увеличении давления в предсердии сердечный выброс практически не изменяется. Вместе с тем, зона II характеризуется стабилизирующим действием нейро-гуморального канала управления. При значениях $K_3 \leq 0,25$ нейро-гуморальный канал управления уже не может обеспечить стабилизацию кровотока и артериального давления в заданном диапазоне, и модель системы кровообращения переходит в состояние необратимого кардиогенного шока (зона III).

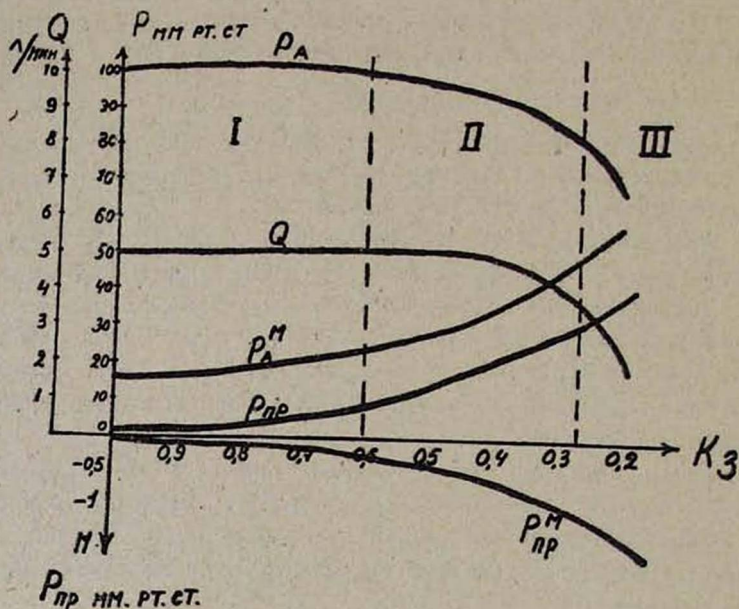


Рис. 2. Статические характеристики в условиях дозированной сердечной недостаточности.

P_A — давление в аорте; P_A^M — давление в легочной артерии; $P_{пп}$ — давление в левом предсердии; $P_{пп}^M$ — давление в правом предсердии; Q — сердечный выброс.

На модели исследовали также корректирующее воздействие насоса вспомогательного кровообращения, подключенного параллельно левому желудочку при различной степени сердечной недостаточности. Для этого система уравнений дополнялась уравнением насоса:

$$\Sigma Q = Q + K_{10} \cdot Q_n,$$

где Q — производительность сердца; Q_n — максимальная производительность насоса, равная 5 л/мин; K_{10} — коэффициент, характеризующий текущую производительность насоса; ΣQ — суммарная производительность сердца и насоса.

На рис. 3 представлены кривые мощности левого желудочка, снятые в условиях различной степени недостаточности. Кривая 1 характеризует мощность желудочка в зоне I, кривая 2—в зоне II, кривая 3—в зоне III. Как видно в зоне II мощность левого желудочка превышает исходную (до подключения насоса) при производительности 1,7 л/мин, а в зоне III—до производительности 2,3 л/мин. Вместе с тем известно [4, 7], что основным показателем эффективности шунтирования сердца является уменьшение его насосной функции за счет снижения перекачиваемого им объема крови.

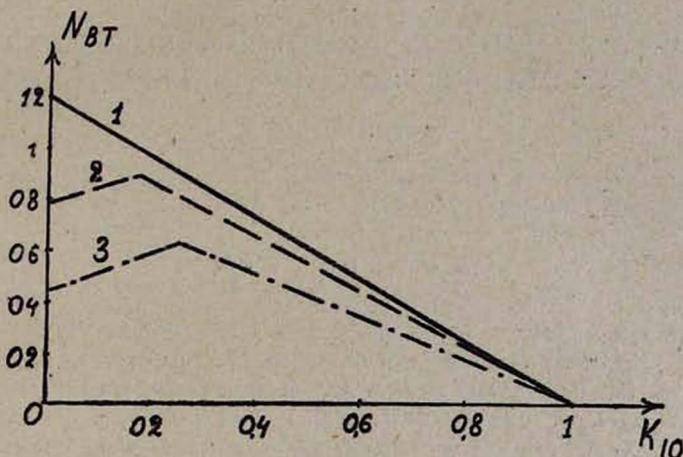


Рис. 3. Зависимость мощности левого желудочка от производительности шунта: 1—при компенсированной недостаточности, 2—при частично компенсированной недостаточности, 3—при декомпенсированной недостаточности.

Таким образом, исследования на математической модели показывают, что в условиях сердечной декомпенсации параллельное шунтирование левого желудочка может привести к увеличению его насосной функции в том случае, когда объем шунтирования менее 50% ударного выброса крови. В случае шунтирования всего ударного объема насосная мощность и внешняя работа сердца практически равна 0. В связи с этим при управлении насосом вспомогательного кровообращения необходимо учитывать степень сердечной недостаточности и в зависимости от этого оптимизировать производительность насоса.

Գ. Պ. ԻՏԿԻՆ, Վ. Ե. ՏՈԼՊԵԿԻՆ, Կ. Լ. ՄԵԼՈՒԶՈՎ, Ռ. Մ. ԿՈՒՐԴԻՆԻԱՆ

ՍՈՒՐ ՍՐՏԱՅԻՆ ԱՆԲԱՎԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ
ՄՈԴԵԼԸ, ՆՐԱ ԱՍՏԻՃԱՆԸ ԵՎ ՍՐՏԻ ԶԱՆ ՓՈՐՈՔԻ ՇՈՒՆՏԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Տրված է արյան շրջանառության համակարգի մաթեմատիկական մոդելի նկարագրությունը, անց է կացված «ձախ փորոք-աորտա» շունտավորման արդյունավետության հետազոտություն:

G. P. ITKIN, V. E. TOLPEKIN, K. L. MELOUZOV, R. M. KURGINIAN

MATHEMATICAL MODEL OF ACUTE CARDIAC INSUFFICIENCY,
ITS DEGREE AND SHUNTING OF THE LEFT VENTRICLE

S u m m a r y

The authors give the mathematical model of circulatory system and the results of study of shunting efficiency, according to the scheme—left ventricle—aorta.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гайтон А. В кн.: Физиология кровообращения. М., 1969.
2. Лищук В. А. В журнале Автоматика, 1967, 3, 27.
3. Петровский Б. В., Шумаков В. И. и др. Труды Межд. симп. ИФАК по техническим и биологическим проблемам. Ереван, 1968, 65.
4. Шумаков В. И., Новосельцев В. Н. и др. Моделирование физиологических систем организма. М., 1971.
5. Шумаков В. И., Могилевский Э. В. и др. Кардиология, 1968, 11, 25.
6. Beneken E. Proc. of the 1-th Symp. of pulsativ blood flow, 1963, 11, 5.
7. Dennis C. et al. Circ. res. 1962, 10, 298.
8. Gradins F. et al. Beavav Sci. 1970, 1, 88.