

Ю. Н. МИХАИЛОВ, В. А. САНДРИКОВ, Е. Б. СВИРЩЕВСКИЙ,  
В. И. САДОВНИКОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИИ ИЗГНАНИЯ И ОСТАТОЧНЫХ ОБЪЕМОВ СЕРДЦА ПО КРИВЫМ ВНУТРИЖЕЛУДОЧКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время известно, что активное состояние сердечной мышцы представляется как «механическая мера химических процессов, происходящих в сократительном компоненте мышцы и генерирующих силу и укорочения» [1, 2]. При этом изменения соотношения «сила—скорость» в миокарде регулируются с помощью двух механизмов: изменением конечного диастолического объема и инотропными факторами, характеризующими контрактильность миокарда [5].

Рассматривая вопрос, связанный с изменением объема желудочка, предположим, что во время исследования сократительная функция миокарда не изменяется.

В данной работе рассматривается принципиальный вопрос количественной оценки фракции изгнания и остаточных объемов крови в полостях желудочков сердца на анализе кривой внутрижелудочкового давления.

*Методика.* В отличие от модели Maxwell, предложенной Хиллом [3], будет использоваться модель Voigt (рис. 1 А), отличающаяся только расположением группы параллельного эластического элемента. Этот выбор определен тем, что факты, накопившиеся в последнее время [4, 6, 8], наиболее удовлетворительно объясняют модель Voigt.

Рассмотрим произвольно выбранный участок мышцы, и пусть  $F(t)$  сила (нормальная, составляющая), которая генерируется мышцей в момент  $t$ , а  $P(t)$ —давление внутри полости в этот момент времени. Тогда при условии, что рассматриваемая нами система «кровь+мышца» находится в равновесии, функции  $F(t)$  и  $P(t)$  связаны между собой известным соотношением:

$$F(t) = P(t) \cdot S(t) \quad (1)$$

где  $S(t)$ —площадь поверхности, через которую действует сила  $F(t)$ .

Так как наша задача определить конечный диастолический и систолический объемы полости, то рассмотрим функцию  $P(t)$  именно в те временные интервалы, когда внутри полости содержатся искомые объемы  $V_{kd}$  и  $V_{ks}$  (рис. 1 В). Эти интервалы соответствуют периодам изоволюмического сокращения и расслабления (I, III). Предположим, что в эти моменты времени система находится в состоянии равновесия, в силу чего

соответствующие площади поверхностей остаются постоянными, т. е.  $S_{kd} = \text{const.}$  и  $S_{kc} = \text{const.}$  Тогда на этих участках функции  $P(t)$  и  $F(t)$  совпадают с точностью до постоянного множителя:

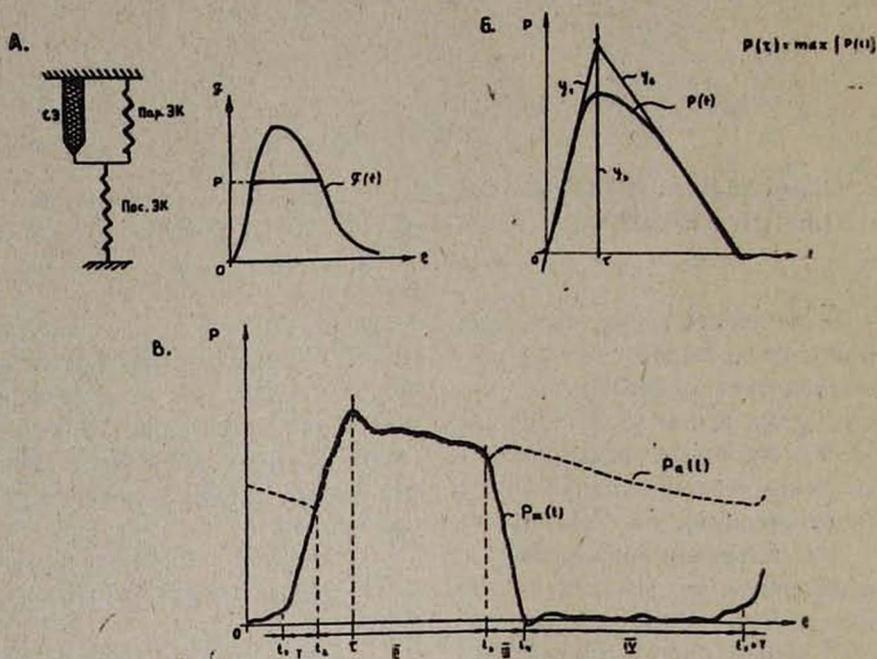


Рис. 1. А—кривая развития силы и модель мышцы, предложенная Хиллом (1938). СЭ—сократительный элемент; Пар. ЭК—параллельный эластический компонент; Пос. ЭК—пассивный эластический компонент. Б—определение по кривой  $P(t)$  момента достижения максимума. В.—определение интегральной фазовой структуры кривой внутрижелудочкового давления.

$$F(t) = S_{kd} \cdot P(t), \quad t \in I \quad (2)$$

$$F(t) = S_{kc} \cdot P(t) \quad t \in III \quad (3)$$

Если бы интервалы I и III имели хотя бы одну общую точку, то используя соотношение (2) и (3), мы нашли бы и отношения между  $S_{kd}$  и  $S_{kc}$ . Однако наличие общей точки в интервалах I и III означает, что процесс генерирования силы мышцей происходит в условиях полной изоволюмии, т. е. при отсутствии выброса крови. Предполагая, что ударного выброса не произошло, функция  $P(t)$  в этом случае на участке изоволюмического сокращения продолжала бы расти вплоть до момента максимального развития силы (рис. Б)—точки  $(\tau)$ . Пусть в этот момент времени

$$P(\tau) = H_1 \quad (4)$$

На участке изоволюмического расслабления (III) давление падало, начиная с этого же момента времени  $(\tau)$ , т. е. с места движения максимума силы. Пусть

$$P(\tau) = H_2 \quad (5)$$

Совпадают ли между собой значения  $H_1$  и  $H_2$ ? Если  $F_{max} = F(\tau)$ , то

$$H_1 = F(\tau)/S_{кд}, \quad (6)$$

а 
$$H_2 = F(\tau)/S_{кс} \quad (7)$$

Разделив эти два отношения одно на другое, получим значение

$$\beta = \frac{H_1}{H_2} = \frac{S_{кс}}{S_{кд}} \leq 1 \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что отношение  $S_{кс}/S_{кд}$  можно заменить отношением  $H_1/H_2$ . Знание величины  $\beta$  уже само по себе обладает определенным интересом, так как позволяет получить отношение  $\gamma$  между скоростью расслабления и нарастания (сокращения) силы в сократительном элементе:

$$\gamma = -\beta \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (9)$$

где  $\omega_1 < 0$  есть  $\bar{P}(t)$ , для  $t \in (t_1, t_2)$

$\omega_2 > 0$   $\bar{P}(t)$ , для  $t \in (t_3, t_4)$

Таким образом, зная момент максимального развития силы и экстраполируя до этого момента времени участки изоволюмического сокращения ( $y_1$ ) и расслабления ( $y_2$ ) фракции  $P(t)$  (рис. 1 Б), можно найти отношения между площадями поверхностей, соответственно конечного систолического и конечного диастолического объемов полости желудочков.

Для нахождения точки ( $\tau$ ), т. е. момента максимального развития силы желудочков сердца, рассмотрим первую производную по времени функцию  $F(t)$ :

$$F'_t(t) = P'_t(t) \cdot S'(t) + P(t) \cdot S'_t(t); \quad (10)$$

и приравняем ее нулю:

$$F'_t(\tau) \cdot S(\tau) + P(\tau) \cdot S'_t(\tau) = 0,$$

так как функции  $S(t)$  и  $P(t)$  положительно определены, то равенство 10 возможно только в том случае, если  $P'_t(\tau)$  и  $S'_t(\tau)$  — разных знаков. Физически это означает следующее: момент максимального развития силы ( $\tau$ ) лежит в интервале, начиная с момента начала выброса ( $S'_t(t) < 0$ ) и до момента наступления максимального значения  $P(t) \cdot (P'_t(t) = 0)$ . Имея в своем распоряжении только функцию  $P(t)$ , ничего более определенного сказать нельзя. Поэтому за момент максимального развития силы ( $\tau$ ) мы принимаем точку, соответствующую середине вышеуказанного интервала неопределенности  $(t_1, t_2)$ .

При наличии объемного кровотока (рис. 2 Г) —  $Q(t)$  момент достижения максимума силы соответствует моменту максимального значения первой производной по времени функции  $Q(t)$ , т. е.

$$\dot{Q}(\tau) = \max [Q(t)] \quad (11)$$

Прежде чем перейти к оценке величины фракции изгнания (ФИ) крови из желудочков сердца, на основании которой и будут определяться объемы крови в полостях желудочков, нам необходимо принять некоторые предположения в отношении связи между формой полости желудочка и его объемом. Эти предположения кратко можно сформулировать следующим образом: 1. Во время изгнания длина большой оси желудочка не изменяется (рис. 2А). 2. При изменении объема желудочка поверхность его полости сохраняет свою форму.

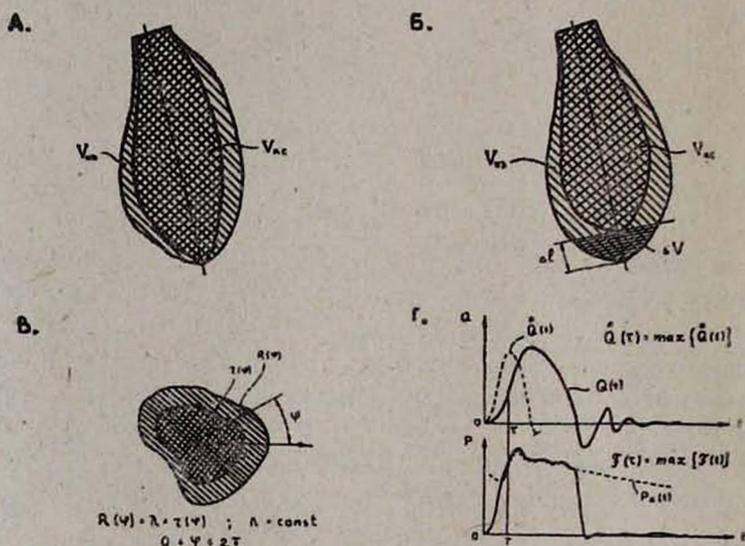


Рис. 2. А—графическое представление предпосылки 1.  $V_{кд}$ —конечно-диастолический объем желудочка;  $V_{кс}$ —конечно-систолический объем желудочка. Б—несоответствие предпосылки 1 реальным ситуациям; В—графическое представление предпосылки 2; Г—определение  $\tau$  по кривой объемного кровотока.

Основанием для принятия первого предположения могут служить факты [4, 5], показывающие, что большая ось желудочка за время систолы укорачивается на 7—8%, чем можно пренебречь при практической реализации метода (рис. 2 Б). Второе предположение формализуется следующим образом. Рассмотрим прямоугольную систему координат, и пусть направление оси  $Oz$  совпадает с направлением большой оси желудочка, а начало координат—с его верхушкой. Тогда если  $s(z)$  площадь сечения полости желудочка, проведенного перпендикулярно оси  $Oz$  ( $0 \leq z \leq z_0$ ), а  $v$ —объем желудочка, то

$$v = \int_0^{z_0} s(z) dz \quad (12)$$

Рассмотрим кривую (рис. 2 В), полученную пересечением поверхности желудочка с плоскостью  $z = \text{const}$  ( $0 \leq z \leq z_0$ ), и пусть в этой плоскости уравнение кривой:

$$r = r(\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

причем положительное направление угла  $\varphi$  выбрано произвольно, а за центр взята точка с координатами  $(0, 0, z_1)$ . Под неизменностью формы кривой будем понимать выполнение следующего условия: кривые  $r_3(\varphi)$  и  $R(\varphi)$  эквивалентны в смысле формы, если

$$r_2(\varphi) = \lambda \cdot R(\varphi), \quad \lambda \geq 0 \quad (13)$$

Две поверхности назовем эквивалентными по форме, если условие 13 выполнено для любого  $z \in [0, z_0]$ . Для поверхностей, эквивалентных по форме, верны следующие соотношения:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{\lambda^3} \quad \text{и} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{1}{\lambda} \quad (14)$$

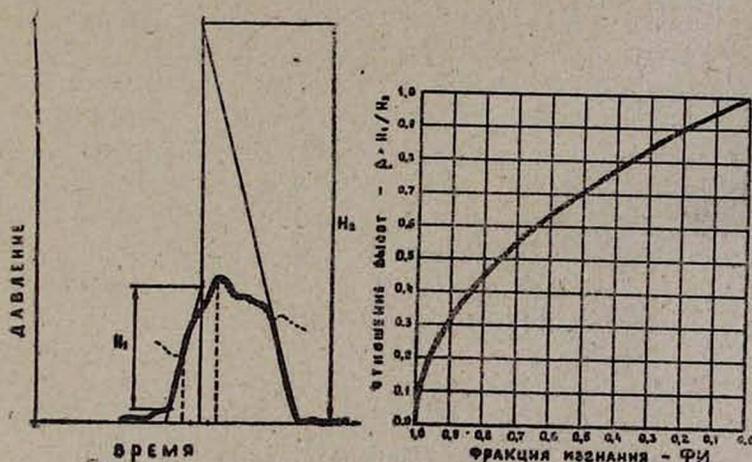


Рис. 3. Номограмма для определения фракции изгнания

*Номограмма для определения фракции изгнания.* На кривой внутрижелудочкового давления определяются моменты времени, соответствующие началу изгнания, и пиковое давление. Временной интервал между этими моментами делим пополам и из полученной точки восстанавливаем перпендикуляр. Линейно экстраполируя участки изоволюмического сокращения и расслабления (кривой  $P(t)$ ) до пересечения с вышеуказанным перпендикуляром (рис. 3), проводим горизонтальную прямую, соответствующую конечному диастолическому давлению. Измеряем высоты  $H_1$  и  $H_2$ . Находим отношение:

$$\beta = H_1/H_2.$$

Таблица  
Сопоставление величин конечно-диастолических объемов, полученных двумя методами—прямым и по кривой внутрижелудочкового давления у животных

Вес, кг	Показатели внутрисердечной гемодинамики			
	прямой метод			рассчитанный
	V кс, мл	УВ, мл	V кд, мл	V кд, мл
15	2,2	3,0	5,2	5,0
15	1,0	4,5	5,5	5,8
20	1,5	6,2	7,7	7,5
17	1,0	4,0	5,0	5,0
18	2,0	8,0	10,0	11,0
*17	1,54	5,14	6,68	6,86
1,3	0,7	1,33	1,39	1,5

*Примечания:* V кс—конечно-систолический объем желудочка; УВ—ударный выброс; V кд—конечно-диастолический объем желудочка; V кд(рас)—конечно-диастолический объем, рассчитанный по кривой внутрижелудочкового давления.

Переходим к номограмме. На вертикальной оси находим значения, соответствующие  $\beta$ . Проводя через точку  $\beta$  горизонтальную прямую до пересечения с кривой номограммы и опустив из точки пересечения перпендикуляр на горизонтальную ось, находим значение для фракции изгнания. Имея в своем распоряжении величину ударного выброса, можно рассчитать конечный диастолический объем желудочка.

*Экспериментальная верификация предлагаемого метода.* На беспородных собаках весом 15—20 кг выполнено 5 опытов. После вскрытия грудной клетки животного под наркозом проводилось выделение аорты, легочной артерии и легочных вен. Легочные вены тщательно лигировались. На аорту (рис. 4а) в области отхождения коронарных артерий накладывали зажим. Непосредственно дистальнее зажима аорту пересекали, конец ее опускали в мерную колбу. К миокарду левого желудочка сердца подшивали электроды электрокардиостимулятора (ЭКС). В полость левого желудочка через его стенку пункционно проводили катетер, соединенный с системой измерения давления. Зажим с аорты снимался, и единичным разрядом с ЭКС вызывали сокращение миокарда желудочка, регистрируя одновременно кривую внутрижелудочкового давления на самописце (рис. 4а, б). После выброса из желудочка объема крови в мерную колбу вновь накладывали зажим на аорту. Затем вскрывали полость левого желудочка и шприцем отсасывали кровь (рис. 4г), тщательно измеряя ее количество. Этот объем является характеристикой конечного систоли-

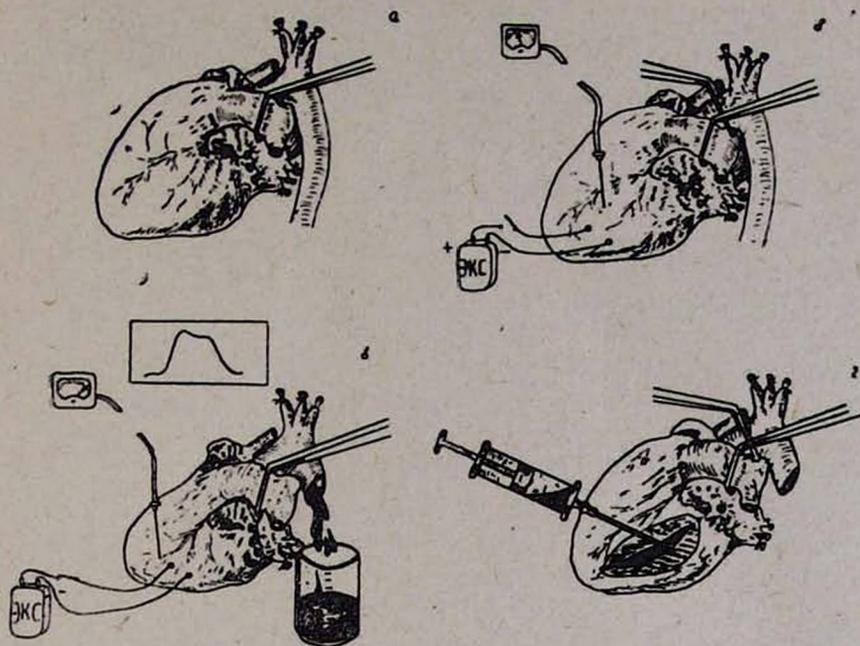


Рис. 4. Этапы экспериментального определения конечно-диастолического объема желудочка.

ческого объема крови. Сумма этих величин давала значение конечно-диастолического объема желудочка.

Далее проводили вычисления конечного диастолического объема желудочка по кривой внутрижелудочкового давления, сравнивая с полученным прямым методом аналогичным показателем. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Коэффициент корреляции между  $V_{кд}$  и  $V_{кд(рас)} = 0,9902$ . Уравнение линейной регрессии:  $V_{кд} = 1,16 \cdot V_{кд(рас)} - 0,92$ .

### Выводы

1. Предложен метод оценки фракции изгнания и остаточных объемов желудочка посредством анализа кривой внутрижелудочкового давления.

2. Оценка остаточного объема желудочка не связана с заранее заданной конфигурацией его полости (типа сферы, эллипсоида и т. п.).

3. Предлагаемая методика позволяет производить серийные измерения остаточных объемов желудочка.

Յու. Ն. ՄԻԽԱՅԼՈՎ, Վ. Ա. ՍԱՆԴՐԻԿՈՎ, Ե. Բ. ՍՎԻՐՇԵՉԵՎՍԿԻ, Վ. Ի. ՍԱՆԴՐԻԿՈՎ

ՎՏԱՐՄԱՆ ՖՐԱԿՑԻԱՅԻ ԵՎ ՍՐՏԻ ՄՆԱՑՈՐԴԱՅԻՆ ԾԱՎԱԼՆԵՐԻ  
ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՆԵՐՓՈՐՈՔԱՅԻՆ ՃՆՇՄԱՆ ԿՈՐՈՎ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Սույն աշխատանքում առաջարկված է վտարման ֆրակցիայի և սրտի մնացորդային ծավալների որոշման մեթոդը ներփոքորային ճնշման կորով:

Yu. N. MIKHAILOV, V. A. SANDRIKOV, E. B. SVIRSCHEVSKY,  
V. I. SANDRIKOV

DETERMINATION OF FRACTION OF EXPULSION AND RESIDUAL  
HEART VOLUME BY INTRAVENTRICULAR PRESSURE CURVES

S u m m a r y

Determination method of fraction of expulsion and residual heart volume by intraventricular pressure curves is suggested in this work.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Браунвальд Е., Росс Дж., Зонненблик Е. Механизмы сокращения сердца в норме и при недостаточности. М., 1974.
2. Меерсон Ф. З. Адаптация сердца к большой нагрузке и сердечная недостаточность. М., 1975.
3. Хилл А. Механика мышечного сокращения, М., 1972.
4. Bartle S., Sanmarco M. Am. J. Cardiol. 1966, 18, 235—252.
5. Ross Y., Sonnenblick E., Covell Y. et al. Circulat. Res., 1967, 21, 409—421.
6. Sonnenblick E., Parmley W. Am. J. of Cardiology, 1969, 23, 488—503.
7. Sonnenblick E., Snelton C. Circulat. Res., 1974, 4, 35, 517—526.
8. Stegel J., Souneublick E. Circulat. Res., 1963, 6, 12, 597—610.