

3. *Hassan M., Kadone H., Suzuki K. et al.* Wearable Gait Measurement System with an Instrumented Cane for Exoskeleton Control // *Sensors (Basel)*. 2014 Jan. Vol. 14 (1). PP. 1705-1722.
4. *Tran H.-T., Cheng H., Lin X.C. et al.* The relationship between physical human-exoskeleton interaction and dynamic factors: Using a learning approach for control applications // *Sci. China Inf. Sci.* 2014. Vol. 57.
5. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ // *Компоненты и технологии*. 2006. № 7.
6. *Bortole M., Venkatakrishnan A., Zhu F. et al.* The H2 robotic exoskeleton for gait rehabilitation after stroke: Early findings from a clinical study // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2015. Vol. 12. P. 54.
7. *Mohammadi F., Azma K., Naseh I. et al.* Military Exercises, Knee and Ankle Joint Position Sense, and Injury in Male Conscripts: A Pilot Study // *Journal of Athletic Training*. 2013. Vol. 48 (6). PP. 790-796.
8. *Skau J.R., Souza F.A., dos Anjos Fernandes H.F. et al.* Joint position sense is not affected by fatigue of hip abductors muscles / *Proceedings of the XXIV Congress of the International Society of Biomechanics*. Natal, Brazil, August, 2013.
9. *Trousselard M., Barraud P., Nougier V. et al.* Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity // *Cognitive Brain Research*. 2004. Vol. 20. Iss. 3. PP. 355-362.
10. *Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M.* Complementary filter design on the special orthogonal group SO(3) / *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*. 2005. Seville, Spain, December, 2005.

Сергей Алексеевич Минеев,
 канд. физ.-мат. наук, доцент,
Владислав Антонович Новиков,
 канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
Ирина Валентиновна Кузьмина,
 мл. научный сотрудник,
Научно-исследовательский
физико-технический институт
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского,
Роман Андреевич Шаталин,
 программист,
Илья Владимирович Гринь,
 магистрант,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
 г. Н.-Новгород,
 e-mail: sergm@nifti.unn.ru

Д.С. Петухов, Д.В. Тельшев

Исследование чувствительности роторного насоса крови «Спутник» к преднагрузке и постнагрузке

Аннотация

Проведен анализ работы роторного насоса крови «Спутник» путем исследования его реакции на изменения в пред- и постнагрузке. Предложена математическая модель насоса, и проведено сравнение с моделями насосов «DuraHeart» и «Incor». Исследовано влияние постнагрузки на расход насосов и чувствительность к преднагрузке, продемонстрирована связь чувствительности к преднагрузке с формой расходно-напорных характеристик. Показано, что насос «Спутник» имеет большую чувствительность к преднагрузке [среднее значение $(0,121 \pm 0,0092)$ л·мин⁻¹·мм рт. ст.⁻¹] за счет более пологой формы расходно-напорной характеристики по сравнению с насосами «DuraHeart» и «Incor».

Введение

Импантируемые роторные насосы крови (РНК), предназначенные для частичного замещения функции левого желудочка, помимо конструктивных особенностей [1] обладают уникальными расходно-напорными характеристиками. В литературных источниках приводятся различные варианты сравнения насосов с целью определения их влияния на эффективность разгрузки желудочка сердца и физиологичность поддержки кровообращения [2], [3]. Одним из вариантов такого сравнения является исследование формы расходно-напорных кривых и чувствительности к изменениям в пред- и постнагрузке [2], [3].

Так, предполагается, что увеличение чувствительности к преднагрузке у РНК может играть важную роль в разгрузке желудочка. Чем больше чувствительность РНК к преднагрузке, тем более эффективно осуществляется снижение расхода крови при уменьшении давления в желудочке, что, в свою очередь, понижает риск возникновения коллапса желудочка. В данном случае необходимость в регулировке скорости также будет минимальной [2], [4], [5].

Цель рассматриваемой работы заключается в анализе работы роторного насоса крови «Спутник» путем исследования его реакции на изменения в преднагрузке, постнагрузке и сравнении с другими роторными насосами крови. Исследуемый РНК, имеющий осевое направление течения крови, используется в российском аппарате вспомогательного кровообращения (АВК) «Спутник», который успешно эксплуатируется в клинических условиях [6].

Методы

Для анализа работы насоса была разработана его математическая модель. Теоретическое выражение для статической расходной характеристики осевых насосов записывается согласно [7] в следующем виде:

$$H_e = \frac{u}{g} \left(u - \frac{Q_e}{A_2} \cdot \text{ctg} \beta^2 \right)$$

где H_e – эйлеров гидростатический напор; Q_e – поток через насос; u – периферическая скорость ротора; A_2 – эффективная площадь выходного отверстия; β_2 – угол лопатки на выходе

насоса. В данном уравнении перепад давлений H_e имеет квадратичное соотношение со скоростью ротора u и линейное – с расходом Q_e . Из этого следует общее выражение для статических расходно-напорных характеристик (РНХ) осевых насосов, которое можно записать в следующем виде:

$$a \cdot Q + b \cdot H + c \cdot \omega^2 + d \cdot Q^2 + e \cdot Q^3 = 0,$$

где Q – расход насоса, л/мин; H – перепад давлений на насосе, мм рт. ст.; ω – скорость насоса, мин⁻¹; $a-e$ – коэффициенты, значения которых получены с помощью методов оптимизации. Введение дополнительных членов Q^2 и Q^3 позволяет воспроизвести S-образную форму статической расходно-напорной кривой, характерной для роторных насосов осевого типа [8].

В качестве основы для математической модели используются статические расходные характеристики насоса «Спутник», которые были получены на гидродинамическом стенде в Рейнско-Вестфальском техническом университете г. Ахена (Ахен, Германия) [9]. Вязкость жидкости равнялась 2,5 сП. С помощью системы управления стендом на насосе выставлялся фиксированный перепад давлений, после чего записывался расход насоса с помощью ультразвукового расходомера ME-11PXL («Transonic Systems Inc.», Итака, Нью-Йорк, США). Перепад давлений изменялся в диапазоне от 150 до –50 мм рт. ст. с шагом 25 мм рт. ст.

Точность исходного выражения для статических РНХ была улучшена с помощью процедуры оптимизации на основе нелинейных методов наименьших квадратов. К исходному уравнению прибавляли член из списка заранее заданных вспомогательных функций, после чего производили оптимизацию полученного уравнения и расчет критериев соответствия экспериментальным данным. Таким образом, было получено специфичное для данного насоса уравнение и подобраны коэффициенты, позволяющие воспроизвести расходно-напорные характеристики с приемлемой точностью ($R^2 = 0,998$). Итоговое выражение записывается в следующем виде:

$$a \cdot Q + b \cdot H + c \cdot \omega^2 + d \cdot Q^2 + e \cdot Q^3 + f \cdot \omega \cdot Q = 0.$$

Точность предложенной модели продемонстрирована на рис. 1. Точки, по которым производилась оптимизация, отмечены черными кругами, черными маркерами отмечены модельные значения в точках оптимизации, общий вид расходно-напорных кривых представлен с помощью пунктирных линий при различных скоростях насоса. Список значений коэффициентов и критерии соответствия (RMSE, R^2) приведены в табл. 1.

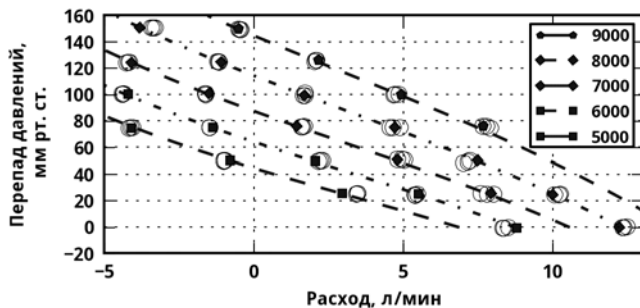


Рис. 1. Визуальная проверка на точность для модели насоса «Спутник»

Таблица 1

Список значений коэффициентов для модели насоса и критериев соответствия

$a = 0,302344029$ мм рт. ст.
$b = 0,090447735$ л/мин
$c = -1,61574312e-07$ л·мин·мм рт. ст.
$d = -0,0126948325$ мин·мм рт. ст. / л
$e = 0,00129660584$ мин ² ·мм рт. ст. / л ²
$f = 6,24084623e-05$ мин·мм рт. ст.
RMSE = 0,2269659; $R^2 = 0,99817025$

Результаты

На рис. 2 показано влияние входного давления на расход насоса при различных скоростях роторного насоса «Спутник» и постоянной постнагрузке (80 мм рт. ст.). Входное давление варьировалось в диапазоне от –30 до 30 мм рт. ст. и при скоростях от 6 000 до 8 500 об/мин. Видно, что увеличение скорости в одном и том же диапазоне преднагрузки приводит к увеличению расхода.

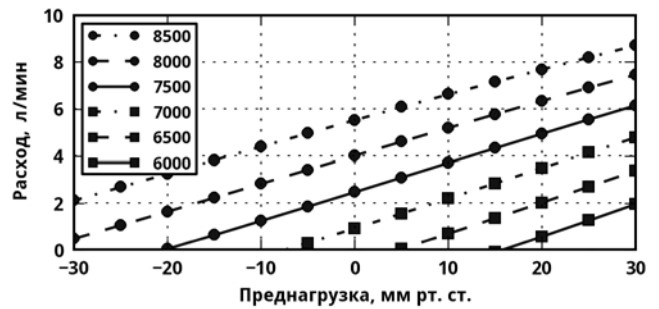


Рис. 2. Изменение расхода насоса «Спутник» в диапазоне входных давлений от –30 до 30 мм рт. ст. и при различных скоростях

Чувствительность к преднагрузке dQ/dP_i (л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹) определялась как отношение расхода насоса Q (л/мин) к давлению на входе P_i (мм рт. ст.) и рассчитывалась согласно работам [2], [4]. Для этого были использованы зависимости, показанные на рис. 2, в физиологическом диапазоне от –5 до 30 мм рт. ст. с шагом 0,25 мм рт. ст. Результаты приведены в табл. 2 в диапазоне расходов от 1 до 8 л/мин при скоростях от 6 500 до 8 500 об/мин. Максимальное значение чувствительности к преднагрузке не превышает 0,14 л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹, среднее значение составляет $(0,121 \pm 0,0092)$ л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹. Полученные значения выше, чем средние значения чувствительности к преднагрузке для роторных насосов крови $(0,077 \pm 0,04)$, но тем не менее ниже средних значений для биологического сердца $(0,241 \pm 0,04)$ [3].

На рис. 3 показаны зависимости перепада давления на насосе от расхода (РНХ) и изменения в расходе при изменениях в преднагрузке для роторных насосов «Спутник», «DuraHeart» и «Incoг». Для этого из работы [2] были взяты модели насоса «DuraHeart» при скорости 2 000 об/мин и насоса «Incoг» при скорости 8 000 об/мин. Для насоса «Спутник» была выбрана скорость 8 500 об/мин, обеспечивающая примерное соответствие с кривыми для «DuraHeart» и «Incoг» на зависимости расхода от преднагрузки при постоянной постнагрузке 80 мм рт. ст.

Насос «Спутник», имеющий ротор осевого типа, имеет более пологие РНХ по сравнению с насосом «DuraHeart», имеющим ротор центробежного типа. Данная разница наиболее заметна при малых перепадах давления на насосе (от 30 до 70 мм рт. ст.), она также обуславливает более наклонную форму кривой для насоса «Спутник» на зависимостях расхода от преднагрузки. Следует отметить, что уменьшение постнагрузки со 100 до 60 мм рт. ст. приводит к существенному увеличению расхода для насосов «Спутник» и «DuraHeart». При этом наклон полученных кривых различен для каждого из насосов, т. е. насосы обладают различной чувствительностью к преднагрузке, которая также зависит от изменений в постнагрузке.

На рис. 4 показаны изменения чувствительности к преднагрузке от расхода насосов, вычисленные из зависимостей, представленных на рис. 3. Видно, что наибольшую чувствительность к преднагрузке демонстрирует насос «Спутник» (около 0,11 л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹) при постнагрузке 100 мм рт. ст. Насос «Incoг» имеет гораздо более низкую чувствительность к преднагрузке (около 0,04 л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹), т. е. его расход в наименьшей степени зависит от изменений в преднагрузке, что и обуславливает наиболее пологую форму кривой на рис. 3.

Уменьшение постнагрузки от 100 до 60 мм рт. ст. приводит к уменьшению чувствительности к преднагрузке, при этом со-

отношение между чувствительностями насосов сохраняется: насос «Спутник» имеет наибольшую чувствительность к изменениям в преднагрузке, насос «Incor» – наименьшую. В то же время уменьшение постнагрузки до 60 мм рт. ст. приводит к наибольшему изменению чувствительности к преднагрузке у насоса «DuraHeart» (от ~ 0,09 до 0,05 л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹).

Также следует отметить, что самую высокую чувствительность к изменениям в преднагрузке показывает насос «Спутник» за счет более пологой формы расходно-напорной характеристики по сравнению с другими насосами.

Заключение

Проведен анализ работы роторного насоса «Спутник». Чувствительность к преднагрузке использовалась в качестве универсального параметра для характеристики работы насоса и его сравнения с другими насосами.

Показано, что все три насоса имеют различную чувствительность к преднагрузке в широком диапазоне расходов и

давлений. Наибольшую чувствительность к изменению в постнагрузке продемонстрировал центробежный насос «DuraHeart».

В то же время осевой насос «Спутник» имеет наибольшую чувствительность к преднагрузке (около 0,11 л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹ при постнагрузке 100 мм рт. ст.), за счет более пологой формы расходно-напорной характеристики. Таким образом, согласно результатам большая чувствительность к преднагрузке обусловлена конструктивными параметрами насоса и не зависит от типа исполнения ротора, что согласуется с данными работы [1].

Следует отметить, что чувствительность к преднагрузке является необходимым параметром, который должен учитываться при сравнении роторных насосов крови наряду с формой расходно-напорных характеристик. В ранних работах также отмечается, что улучшение чувствительности к преднагрузке у имплантируемых роторных насосов крови может уменьшить необходимость в регулировке скорости насоса, а также умень-

Таблица 2

Чувствительность к преднагрузке (л · мин⁻¹ · мм рт. ст.⁻¹) для роторного насоса «Спутник» при различных величинах расхода и скорости

Скорость, об/мин	Расход, л/мин							
	1	2	3	4	5	6	7	8
6500	0,1317	0,1344	0,1356	–	–	–	–	–
7000	0,1261	0,1284	0,1295	0,1292	–	–	–	–
7500	–	0,1230	0,1240	0,1237	0,1221	0,1192	–	–
8000	–	–	–	0,1186	0,1171	0,1146	0,1110	–
8500	–	–	–	–	0,1126	0,1102	0,1070	0,1030

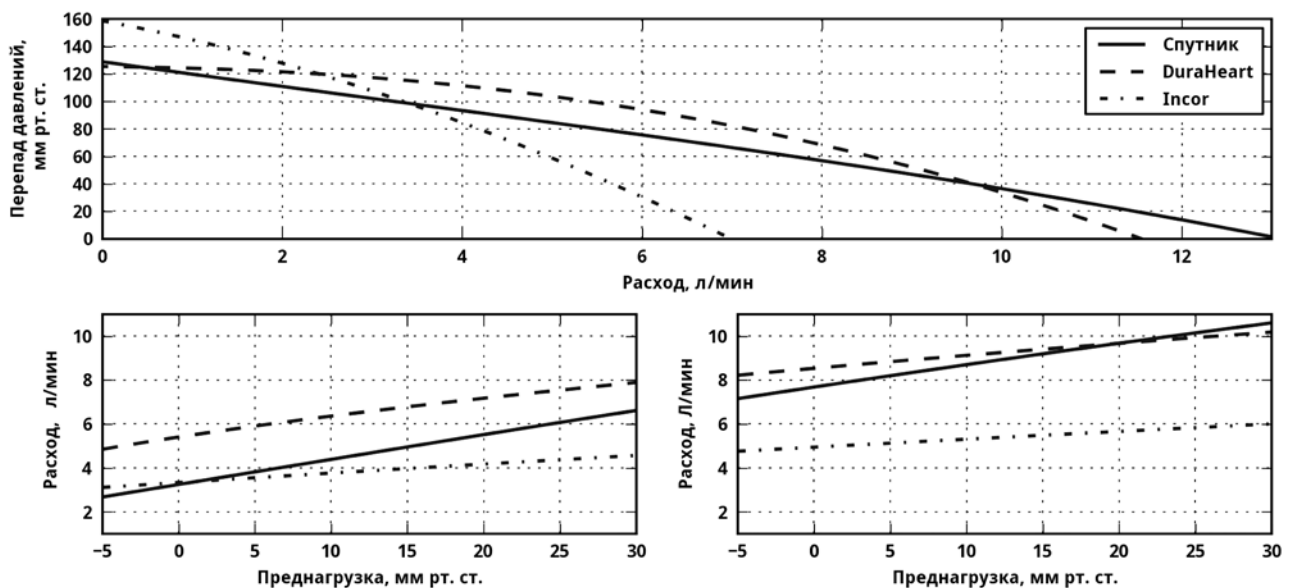


Рис. 3. Зависимости перепада давления на насосе от его расхода и зависимости расхода насоса от преднагрузки для насосов «Спутник», «DuraHeart» и «Incor» при двух значениях постнагрузки: 100 мм рт. ст. (слева) и 60 мм рт. ст. (справа)

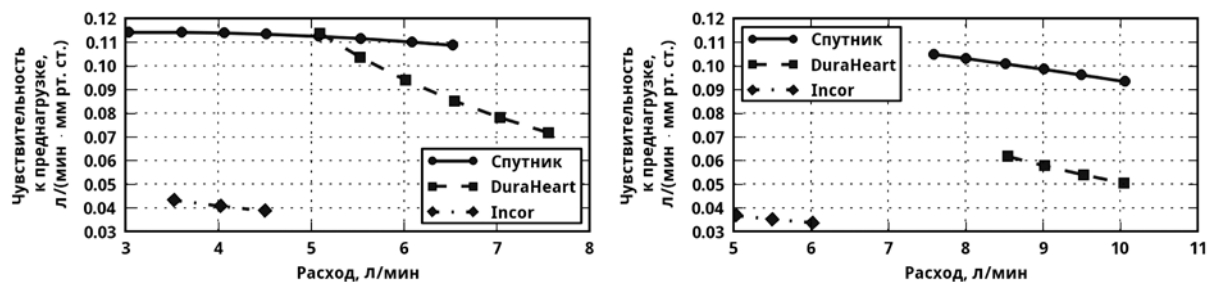


Рис. 4. Сравнение чувствительности к преднагрузке для насосов «Спутник», «DuraHeart» и «Incor» при двух значениях постнагрузки: 100 мм рт. ст. (слева) и 60 мм рт. ст. (справа)

шить риск возникновения коллапса или желудочковой аритмии [4], [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00044).

Список литературы:

1. Moazami N., Fukamachi K., Kobayashi M. et al. Axial and centrifugal continuous-flow rotary pumps: A translation from pump mechanics to clinical practice // *The Journal of Heart and Lung Transplantation*. 2013. Vol. 32. № 1. PP. 1-11.
2. Salamonsen R.F., Mason D.G., Ayre P.J. Response of Rotary Blood Pumps to Changes in Preload and Afterload at a Fixed Speed Setting Are Unphysiological When Compared With the Natural Heart // *Artificial Organs*. 2011. Vol. 35. № 3. PP. 47-53.
3. Fukamachi K., Shiose A., Massiello A. et al. Preload Sensitivity in Cardiac Assist Devices // *The Annals of Thoracic Surgery*. 2013. Vol. 95. № 1. PP. 373-380.
4. Khalil H.A., Cohn W.E., Metcalfe R.W., Frazier O.H. Preload sensitivity of the Jarvik 2000 and HeartMate II left ventricular assist devices // *ASAIO Journal*. 2008. Vol. 54. № 3. PP. 245-248.
5. Frazier O., Khalil H.A., Benkowski R.J., Cohn W.E. Optimization of axial-pump pressure sensitivity for a continuous-flow total artificial heart // *The Journal of Heart and Lung Transplantation*. 2010. Vol. 29. № 6. PP. 687-691.

6. Selishchev S., Telyshev D. Ventricular assist device Спутник: Description, technical features and characteristics // *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*. 2015. Vol. 29. № 3.
7. Stepanoff A.J. Centrifugal and axial flow pumps. – J. Wiley, 1948.
8. Pennings K.A., Martina J.R., Rodermans B.F. et al. Pump Flow Estimation from Pressure Head and Power Uptake for the HeartAssist5, HeartMate II, and HeartWare VADs // *ASAIO Journal*. 2013. Vol. 59. № 4. PP. 420-426.
9. Misgeld B.J., Ruschen D., Schwandtner S. et al. Robust decentralised control of a hydrodynamic human circulatory system simulator // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2015. Vol. 20. PP. 35-44.

Дмитрий Сергеевич Петухов,
аспирант,

Дмитрий Викторович Тельшев,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
кафедра биомедицинских систем,
Национальный исследовательский
университет «МИЭТ»,
г. Зеленоград, г. Москва,
e-mail: telyshev@bms.zone

С.В. Белов, Ю.К. Данилейко, В.В. Ежов, Е.Е. Елканова, С.М. Нефедов, В.В. Осико, В.А. Салюк, В.А. Сидоров

Метод лечения дистрофических заболеваний в гинекологии с применением ударно-волновой деструкции биотканей

Аннотация

В статье приведены результаты исследования механизма ударно-волнового воздействия на поверхностные структуры биотканей с целью их деструкции с использованием лазерного излучения. Параметры лазерного излучения выбраны из условия слабого поглощения и воздействия на биоткани. Для активации ударно-волнового процесса деструкции биотканей с минимальным их термическим повреждением были использованы мелкодисперсные частицы активированного угля с большой долей мезопор, заполненных несвязанной водой. Частицы наносились на поверхность биоткани, на которую воздействовали лазерным излучением.

Приведены результаты гистологических исследований ударно-волнового воздействия на кожу вульвы свиней. Для сравнения представлены результаты, полученные в отсутствие на поверхности кожи водной суспензии мелкодисперсных поглощающих лазерное излучение частиц, при тех же параметрах лазерного воздействия.

Введение

В последние годы отмечается увеличение числа дистрофических гинекологических заболеваний шейки матки, влагалища и вульвы. Согласно классификации, разработанной в 1993 году Международным обществом по изучению болезней влагалища и вульвы (ISSVD) и Международным обществом по гинекологической патологии (ISGP), к доброкачественным поражениям вульвы относятся склеротический лишай и плоскоклеточная гиперплазия (далее – хронические дистрофические заболевания вульвы), а также другие дерматозы. С возрастом их доля в общем количестве гинекологических заболеваний увеличивается, принося страдания женщинам, не давая вести нормальный образ жизни и грозя осложнениями в виде онкологических новообразований.

Несмотря на свою очевидную актуальность, задача лечения дистрофических заболеваний, которая могла бы предотвратить рецидив заболевания, до сих пор не решена. Это обусловлено прежде всего недостаточной эффективностью существующих методов терапии, длительностью заболевания, тя-

жестью клинических проявлений, а также вероятностью злокачественной трансформации вульвы [1].

Увеличение частоты возникновения рака вульвы на фоне предшествующих дистрофических процессов поднимает значимость проблемы профилактики развития злокачественной трансформации на ранних стадиях.

В последние десятилетия в гинекологической практике успешное применение находят СО₂-лазеры, механизм действия которых заключается в преобразовании энергии лазерного излучения в тепловую [2], [3]. В зависимости от степени нагрева воздействие лазера проявляется в эффектах разреза или поверхностного выпаривания тканей. При этом заживление «лазерных» ран происходит достаточно быстро. К недостаткам применения СО₂-лазеров следует отнести вероятность возникновения повышенной кровоточивости при удалении обширных очагов патологии. Обильные кровотечения часто возникают при испарении тканей на глубину более 2 мм. Отмечают также частые рецидивы заболевания на уже деформированной после лазерной коагуляции вульве. Применение СО₂-лазера в гинекологии также серьезно ограничивается сложностью достав-