

### Список литературы:

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. Зверева Г.И., Кислов М.Б., Давыдова Г.И., Крестинин А.В., Кнерельман Е.И. Характеризация продуктов на основе одностойных углеродных нанотрубок методом адсорбции азота // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5. № 11-12. С. 80-87.
3. Томшико М.М., Демичева О.В., Алексеев А.М., Томшико А.Г., Клинова Л.Л., Фетисова О.Е. Многослойные углеродные нанотрубки и их применение // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 5. С. 39-43.
4. Ткачев А.Г., Мищенко С.В., Негров В.Л. и др. Промышленное производство углеродного наноструктурного материала «Таунит» // Наноиндустрия. 2007. № 2. С. 24-26.
5. Tolbin A. Yu., Khabashesku V.N., Tomilova L.G. Synthesis of phthalocyanine tert-butyl ligand conjugates with fluorinecontaining single-walled carbon nanotubes having mobile ether bonds // Mendeleev Communications. 2012. Vol. 22. № 2. PP. 59-61.
6. Раков Э.Г. Получение тонких углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом на носителе // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 1. С. 3-26.
7. Баженов А.В., Фурсова Т.Н., Колесников Н.Н. и др. Электронные и колебательные спектры геля из одностенных уг-

- леродных нанотрубок в ионной жидкости // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. 2008. Т. 2. № 1. С. 56-59.
8. Chernov A.I., Obratsova E.D., Lobach A.S. Optical properties of polymer films with embedded single-wall carbon nanotubes // Physica status solidi (b). 2007. Vol. 244. № 11. PP. 4231-4235.
9. Герасименко А.Ю., Ичкитидзе Л.П., Подгаецкий В.М. и др. Лазерный метод создания биосовместимых наноматериалов с углеродными нанотрубками / Нанотехнологии в электронике. Вып. 2. / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2013. С. 407-448.

*Иван Иванович Бобринецкий,*  
*д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник,*  
*Александр Юрьевич Герасименко,*  
*канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,*  
*Виталий Маркович Подгаецкий,*  
*д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. научный сотрудник,*  
*Михаил Сергеевич Савельев,*  
*аспирант,*  
*кафедра биомедицинских систем,*  
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,*  
*г. Москва, г. Зеленоград,*  
*e-mail: podgaetsky@yandex.ru*

*А.Ю. Герасименко, В.М. Подгаецкий, М.С. Савельев, С.А. Терещенко*

## Исследование нелинейных свойств углеродных наноматериалов при пороговом ограничении мощного лазерного излучения

### Аннотация

Исследованы нелинейные оптические характеристики дисперсных сред (дисперсий) на основе углеродных нанотрубок (УНТ), а также растворы полиметинового красителя ПК-7098 и дицианометиленипиранового красителя ДЦМ-627. Рассчитаны значения пороговой интенсивности для нелинейных процессов и нелинейный коэффициент поглощения. Во всех дисперсиях на основе УНТ обнаружен пороговый эффект, а в красителях пороговый эффект не обнаружен.

### Введение

В последнее время растет интерес к решению задачи о защите глаз и электронных сенсоров от вредного действия мощного лазерного излучения (МЛИ) в промышленности и медицине. При этом требуются новые материалы, которые способны не только ограничивать МЛИ высокой интенсивности, делая его тем самым безопасным, но и максимально уменьшать физические размеры ограничителя МЛИ. Основными нелинейно-оптическими характеристиками ограничителя МЛИ обычно являются:

- линейное пропускание (пропускание при малой плотности мощности лазерного излучения);
- нелинейное пропускание (значительно сниженное пропускание при достаточно большой плотности мощности МЛИ).

Кроме того, исследовался порог ограничения – интенсивность, при которой начинают проявляться нелинейные эффекты, однако преимущественно на качественном уровне.

В настоящей статье внимание уделяется количественному определению порога ограничения. Одно из первых исследований в этом направлении представлено в работе [1], в которой в режиме одиночных и частотных (частота повторения 1...10 Гц) импульсов МЛИ исследовались дисперсные среды (дисперсии) с поглощающими микрочастицами из технического углерода. Такого рода исследования проводились с фуллеренами [2], наночастицами полупроводников и металлов [3], красителями [4], бинарными расслаивающимися растворами [5] и т. п. В последнее время достаточно большое внимание уделяется исследованию углеродных наноматериалов, из которых стоит отме-

тить нанотрубки [6]-[12], графены и различные гибридные материалы на их основе [13].

К настоящему моменту уже выявлены некоторые факторы, влияющие на порог ограничения. Например, в дисперсиях рассеивающие центры представляют собой пузырьки пара, образующиеся около микро- или наночастиц вследствие нагрева их излучением. Рост пузырьков зависит от размеров этих частиц, причем увеличение диаметра нанотрубок позволяет ускорить рост пузырьков и, следовательно, увеличить эффективное рассеяние света, а увеличение длины нанотрубок практически не оказывает влияния на процессы рассеяния [1], [11]. Увеличение концентрации данных частиц в дисперсии вызывает уменьшение порога ограничения, что может быть объяснено увеличением количества пузырьков в единице объема [4], [6]-[8].

Кроме того, на величину порога ограничения также оказывают влияние термодинамические свойства растворителя [2], [8], [10], [11], [13]. Можно выделить две характеристики термодинамических свойств растворителя, влияющие на порог ограничения:

- 1) чем выше поверхностное натяжение границы растворитель-пузырек пара, тем выше величина порога ограничения [3], [8], [11], [13];
- 2) чем ниже температура кипения растворителя, тем ниже величина порога ограничения [3], [8], [10], [13].

В рассматриваемой работе использована пороговая модель зависимости коэффициента поглощения от интенсивности излучения. На основе этой модели по экспериментальным данным Z-сканирования рассчитаны значения пороговой интен-

сивности начала нелинейных процессов для дисперсий на основе углеродных нанотрубок (УНТ) в диметилформамиде (ДМФА) и тетрагидрофуране (ТГФ), а также для растворов полиметинового красителя ПК-7098 и пиранового красителя ДЦМ-627 в пропиленгликолькарбонате (ПГК). Для всех исследованных дисперсий был обнаружен пороговый эффект для нелинейного ограничения интенсивности излучения. В то же время для красителей пороговый эффект не был найден, что доказывает необходимость использования пороговой модели при обработке экспериментальных данных Z-сканирования.

## Методы

Обозначим интенсивность исходного лазерного импульса с произвольным профилем в сечении лазерного луча и произвольным распределением во времени  $I_0(\rho, \varphi, t)$ ,  $(\rho, \varphi)$  – полярные координаты в сечении лазерного пучка;  $t$  – время.

Прохождение импульсного излучения через среду с нелинейным поглощением можно описать с помощью уравнения переноса излучения [14]. Нелинейное взаимодействие лазерного излучения с веществом обычно характеризуется коэффициентом поглощения

$$\mu(I) = \alpha + \beta_0 I, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного поглощения;  $\beta_0$  – коэффициент нелинейного поглощения. В пороговой модели нелинейная среда характеризуется тремя параметрами: коэффициентом линейного поглощения  $\alpha$ , коэффициентом нелинейного поглощения  $\beta$  и некоторым пороговым значением интенсивности  $I_c$ . При этом (рис. 1)

$$\mu(I) = \begin{cases} \alpha, & I < I_c; \\ \alpha + \beta(I - I_c), & I > I_c. \end{cases} \quad (2)$$

Использование этой модели позволяет определить величину порогового значения интенсивности  $I_c$  в отличие от беспороговой модели (1).

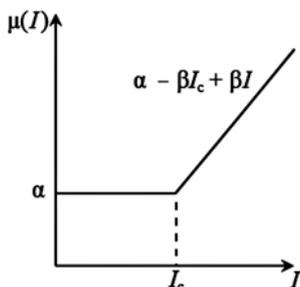


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от интенсивности излучения для пороговой модели

В пороговой модели решение  $I(\rho, \varphi, t, d)$  уравнения переноса излучения (интенсивность лазерного излучения после взаимодействия со средой) имеет следующий вид:

$$I(\rho, \varphi, t, d) = \begin{cases} I_0(\rho, \varphi, t) \exp(-\alpha d), & I_0(\rho, \varphi, t) \leq I_c; \\ \frac{I_c}{\exp(\alpha d)} \left\{ \frac{\alpha I_0(\rho, \varphi, t)}{[\alpha - \beta I_c + \beta I_0(\rho, \varphi, t)] I_c} \right\}^{\frac{\alpha}{\alpha - \beta I_c}}, & I_c < I_0(\rho, \varphi, t) \leq I_1; \\ \frac{(\alpha - \beta I_c) I_0(\rho, \varphi, t) \exp(-[\alpha - \beta I_c] d)}{\alpha - \beta I_c + \beta I_0(\rho, \varphi, t) \{1 - \exp(-[\alpha - \beta I_c] d)\}}, & I_1 < I_0(\rho, \varphi, t) < I_c; \\ I_0(\rho, \varphi, t), & I_0(\rho, \varphi, t) > I_1, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$I_1 = \frac{(\alpha - \beta I_c) I_c}{\alpha \exp[-(\alpha - \beta I_c) d] - \beta I_c}.$$

Полная энергия прошедшего через ограничитель импульса  $U(U_0)$  как функция полной энергии исходного импульса  $U_0$  является выходной характеристикой ограничителя [15], характеризующей его основные свойства по ограничению излучения:

$$U(U_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I(\rho, \varphi, t, d) \rho d\rho d\varphi dt. \quad (4)$$

По результатам Z-сканирования находится зависимость нормализованного пропускания  $T^{(e)}(z)$  от смещения  $z$

$$T^{(e)}(z) = \frac{U^{(e)}(z)}{U_0} \exp(\alpha d). \quad (5)$$

Затем методом наименьших квадратов можно найти значения параметров  $\beta$  и  $I_c$  пороговой модели, минимизирующие квадратичный функционал  $\Phi$  отклонений экспериментальных значений  $T^{(e)}(z)$  нормализованного пропускания от теоретических значений  $T^{(t)}(z)$ :

$$\Phi = \sum_{n=1}^N [T^{(e)}(z_n) - T^{(t)}(z_n)]^2, \quad (6)$$

где  $n$  – номер измерения;  $N$  – число измерений.

Линейный коэффициент поглощения  $\alpha$  может быть определен либо с помощью измерения пропускания спектрофотометром, либо вдали от создаваемой линзой перетяжки пучка лазера, где нелинейные эффекты еще не проявляются. Диаметр лазерного пучка был определен с помощью CCD-камеры.

## Материалы

В работе для проведения исследований были приготовлены дисперсии многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) в ДМФА, МУНТ и однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в ТГФ, а также растворы полиметинового красителя ПК-7098 и пиранового красителя ДЦМ-627 в пропиленкарбонате ПГК. Концентрация и толщина исследуемых образцов в кювете подбирались так, чтобы начальное пропускание было не меньше 60 %.

Были использованы МУНТ, синтезированные низкотемпературным термокаталитическим методом на Ni-катализаторе. Диаметр нанотрубок равнялся 50...60 нм, а длина была 3...7 мкм. Дисперсия с МУНТ готовилась по следующей схеме:

- порошок МУНТ в концентрации ~ 0,1 % мас. смешивался с растворителем (ДМФА, ТГФ);
- полученный коллоидный состав обрабатывался погружным ультразвуковым диспергатором (при мощности  $N = 30...40$  Вт) в течение 30...60 мин;
- состав отстаивался в течение 24 ч.

ОУНТ, синтезированные электродуговым методом на Ni/Y-катализаторе, были очищены на воздухе с промывкой в HCl и функционализированы в смеси  $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ . Диаметр нанотрубок находился в диапазоне 1,4...1,6 нм, а длина – в диапазоне 0,5...1,5 мкм. Дисперсия с ОУНТ готовилась по следующей схеме: водную пасту ОУНТ высушивали при температуре 60 °C в течение суток и потом досушивали при 200 °C еще в течение 4 ч, далее дисперсии ОУНТ готовились так же, как МУНТ.

## Результаты

Определение нелинейных оптических параметров исследованных материалов производилось с использованием излучения второй гармоники ИАГ:Nd-лазера ( $\lambda = 532$  нм) с длительностями импульсов 7 нс и 350 пс. По экспериментальным данным для всех рабочих веществ с помощью пороговой модели расчета, которая учитывает начало нелинейных процессов после достижения определенного значения пороговой интенсивности, были рассчитаны значения нелинейного коэффициента поглощения  $\beta$  и пороговой интенсивности  $I_c$  (табл. 1). На рис. 2 представлены экспериментальные данные Z-сканирования (1), теоретическая кривая, рассчитанная по пороговой модели (2), и положение порога ограничения для дисперсии ОУНТ в ТГФ.

Для углеродных наноматериалов можно сравнить величины порога ограничения, рассчитанного по данным Z-сканирования с помощью пороговой модели и известного по литературным данным (табл. 2).

Так как в литературе обычно приводится значение пороговой удельной энергии  $E_c$ , для пересчета  $I_c$  в  $E_c$  было использовано следующее выражение:

$$E_c = I_c \tau \sqrt{\pi}. \quad (7)$$

Таблица 1

Расчет нелинейного коэффициента поглощения и порогового значения интенсивности

Рабочее вещество	$\lambda$ , нм	$U_0$ , мкДж	$\tau$ , нс	$d$ , см	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>	$w_0$ , мкм	$I_c$ , ГВт·см <sup>-2</sup>
МУНТ в ДМФА	532	124	7	0,2	1,93	20	0,026
МУНТ в ДМФА		182			1,93	20	0,032
МУНТ в ТГФ		114			2,23	21	0,006
МУНТ в ТГФ		184			2,23	22	0,008
МУНТ в ПММА		124		0,5	0,74	21	0
ОУНТ в ПММА		120		0,5	0,66	24	0
ОУНТ в ТГФ		124		0,2	1,78	21	0,022
ОУНТ в ТГФ		184		0,2	1,78	21	0,02

**Примечание:**  $\lambda$  – длина волны МЛИ;  $U_0$  – полная энергия входного импульса;  $\tau$  – длительность входного импульса;  $d$  – ширина слоя рабочего вещества;  $\alpha$  – линейный коэффициент поглощения рабочего вещества;  $w_0$  – радиус пучка в перетяжке;  $I_c$  – пороговое значение интенсивности пороговой модели.

Таблица 2

Пороговые значения начала нелинейных процессов

Нелинейный материал	$\tau$ , нс	$d$ , см	$E_c$ , Дж·см <sup>-2</sup>	Метод для расчета	Ссылка
МУНТ в ДМФА	7	0,2	0,32	Пороговая модель	(*)
МУНТ в ДМФА			0,40		
МУНТ в ТГФ			0,07		
МУНТ в ТГФ			0,10		
ОУНТ в ТГФ			0,27		
ОУНТ в ТГФ			0,25		
ОУНТ в ДМФА	6	1,0	0,20...1,30	По уровню 50 %	[7]
ОУНТ в диметил-ацетамиде			0,20...1,30		
ОУНТ в метил-пирролидоне			0,50...2,00		
ОУНТ в этанол + вода	7	0,2	0,05...0,20	Изменением наклона кривой	[9]
Пучки ОУНТ в воде	15	0,2	0,20	Изменением наклона кривой	[11]
Одиночные ОУНТ в воде			0,40		
МУНТ в воде			0,10		
ОУНТ в хлороформе	2	0,1	0,15	Изменением наклона кривой	[12]
	5		0,04		

**Примечание:** (\*) – собственные данные.

В литературе пороговые значения начала нелинейных процессов определялись либо по уровню 50%-ного отклонения кривой нелинейного пропускания от линейного пропускания [7], либо по резкому изменению наклона кривой нормализованного пропускания [9]-[12].

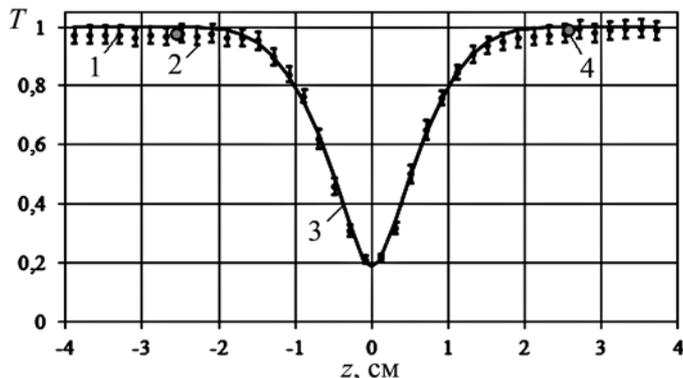


Рис. 2. Результаты Z-сканирования для дисперсии однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в тетрагидрофуране (ТГФ): 1 – экспериментальные данные; 2 – погрешность экспериментальных данных; 3 – нормализованное пропускание, рассчитанное по пороговой модели; 4 – нормализованное пропускание при пороговой интенсивности  $I_c$

### Заключение

Прохождение импульсного излучения через среду с нелинейным поглощением описано с помощью уравнения переноса излучения с учетом порогового эффекта. Исследованы нелинейно-оптические свойства ряда материалов с использованием техники Z-сканирования с открытой диафрагмой на длине волны  $\lambda = 532$  нм.

Знание параметров рабочего вещества ограничителя, т. е. значений  $\alpha$ ,  $\beta_c$  и  $I_c$ , позволяет с помощью пороговой модели более точно рассчитать выходную характеристику ограничителя по сравнению с беспороговой моделью. Кроме того, выходную характеристику ограничителя можно рассчитать не только для толщины слоя рабочего вещества ограничителя, использованного при Z-сканировании, но и для любых других ее значений, а также других значений параметров исходного излучения. Это может значительно упростить задачу проектирования ограничителя лазерного излучения.

**Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.575.21.0089).**

### Список литературы:

1. Mansour K., Van Stryland E.V., Soileau M.J. Optical limiting in media with absorbing microparticles // Proceedings of SPIE. 1989. Vol. 1105. PP. 91-102.
2. Tutt L.W., Boggess T.F. A review of optical limiting mechanisms and devices using organics, fullerenes, semiconductors and other materials // Progress in Quantum Electronics. 1993. Vol. 17. P. 299.
3. Wang J., Blau W.J. Inorganic and hybrid nanostructures for optical limiting // Optics A. 2009. Vol. 11. № 2. PP. 024001-1–024001-16.
4. Manshad R.K., Hassan Q.M.A. Optical limiting properties of magenta doped PMMA under CW laser illumination // Advances in Applied Science Research. 2012. Vol. 3. № 6. PP. 3696-3702.
5. Герасименко А.Ю., Подгаецкий В.М. Ограничение интенсивности лазерного излучения с помощью бинарных расслаивающихся растворов // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 7. С. 591-594.
6. Wang J., Blau W.J. Nonlinear optical and optical limiting properties of individual single-walled carbon nanotubes // Applied Physics B. 2008. Vol. 91. PP. 521-524.
7. Wang J., Blau W.J. Solvent effect on optical limiting properties of single-walled carbon nanotube dispersions // Physical Chemistry C. 2008. Vol. 112. PP. 2298-2303.

8. Wang J., Fruchtl D., Sun Z., Coleman J.N., Blau W.J. Control of optical limiting of carbon nanotube dispersions by changing solvent parameters // *Physical Chemistry C*. 2010. Vol. 114. № 13. PP. 6148-6156.
9. Izard N., Menard C., Riehl D., Doris E., Mioskowski C., Anglaret E. Combination of carbon nanotubes and two-photon absorbers for broadband optical limiting // *Chemical Physics Letters*. 2004. Vol. 391. P. 124.
10. Mishra S.R., Rawat H.S., Mehendale S.C., Rustagi K.C., Sood A.K., Bandyopadhyay R., Govindaraj A., Rao C.N.R. Optical limiting in single-walled carbon nanotube suspensions // *Chemical Physics Letters*. 2000. Vol. 317. PP. 510-514.
11. Izard N., Billaud P., Riehl D., Anglaret E. Influence of structure on the optical limiting properties of nanotubes // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30. № 12. PP. 1509-1511.
12. Vivien L., Riehl D., Delouis J.F., Delaire J.A., Hache F., Anglaret E. Picosecond and nanosecond polychromatic pump-probe studies of bubble growth in carbon-nanotube suspension // *Opt. Soc. Am. B*. 2002. Vol. 19. № 2. PP. 208-214.
13. Siva Y. Carbon Nanotubes – Synthesis, Characterization, Applications // *InTech*. 2011. P. 514.
14. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М. Определение характеристик ограничителя интенсивности оптического излучения на основе нестационарного уравнения переноса излучения в нелинейной среде // *Квантовая электроника*. 2011. Т. 41. № 1. С. 26-29.
15. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М., Герасименко А.Ю., Савельев М.С. Исследование нелинейных характеристик ограничителей интенсивности мощного оптического излучения // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 116. № 3. С. 486-494.

Александр Юрьевич Герасименко,  
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,  
Виталий Маркович Подгаецкий,  
д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. научный сотрудник,  
Михаил Сергеевич Савельев,  
аспирант,  
Сергей Андреевич Терещенко,  
д-р физ.-мат. наук, профессор,  
кафедра биомедицинских систем,  
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, г. Зеленоград,  
e-mail: podgaetsky@yandex.ru

*Д.С. Петухов, С.В. Селищев, Д.В. Тельшев*

## Развитие аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца как наиболее эффективный способ лечения острой сердечной недостаточности

### Аннотация

В статье рассматривается эволюция аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка (АВК ЛЖ). Описываются их конструктивные особенности, и приводится статистика по выживаемости пациентов после трансплантации. Отмечается, что можно выделить три поколения АВК ЛЖ, отличающихся прежде всего конструкцией подвижных частей имплантированных компонентов.

### Введение

Пересадка донорского сердца является золотым стандартом в лечении последней стадии сердечной недостаточности. Однако количество ежегодно пересаживаемых донорских сердец остается практически неизменным на протяжении последних лет; так, в США ежегодно пересаживают около 2000 сердец, в России эта цифра значительно меньше и достигает 100 трансплантаций. Данные цифры гораздо ниже существующей потребности в лечении острых форм сердечной недостаточности. Например, в США потребность составляет около 100 тыс. трансплантаций, в России данная цифра в разы выше.

Поскольку вопрос увеличения количества донорских сердец остается открытым и его решение не представляется возможным в ближайшем будущем, на сегодняшний день эффективным способом лечения острой сердечной недостаточности является использование имплантированных насосов длительной механической поддержки кровообращения. Существует несколько вариантов исполнения, а именно левый насос (ЛН), правый насос, совместное применение левого и правого насосов (бивентрикулярный обход). Наибольшее практическое применение в клинической практике находит ЛН, что в первую очередь связано с большой нагрузкой на левый желудочек сердца, отвечающий за перекачку крови по большому кругу кровообращения. Так, количество имплантаций ЛН в США в 2009 г. превысило количество пересадок донорского сердца [1].

### Основная часть

На сегодняшний день можно выделить три поколения ЛН.

### Первое поколение

К первой категории относятся так называемые насосы пульсирующего типа. В основу изобретения пульсирующих насосов легло предположение о необходимости переноса крови из левого желудочка способом, близким к работе здорового сердца. По этой причине ЛН пульсирующего типа перекачивает кровь в пульсирующем режиме, повторяя насосную функцию левого желудочка. Клинические испытания первого насоса данного типа (HeartMate IP LVAS) были начаты в 1986 году в Техасском институте сердца [2]. И в 1994 году было получено разрешение FDA на применение данного насоса как моста к трансплантологии. Вес имплантированной части составлял около 570 г и обеспечивал скорость потока до 12 л/мин при частоте пульсаций 140 уд./мин.

Использование данного типа насоса позволило значительно понизить смертность от острой сердечной недостаточности относительно результатов медикаментозного лечения. На *рис. 1* представлена статистика выживаемости в зависимости от типа лечения острой сердечной недостаточности, полученная в период 1998...2001 гг. в американских сердечных центрах [3].

Стоит отметить, что изначальный прототип насоса, используемый в 1986 году, имел громоздкий блок управления и ограничивал мобильность пациента за пределами клиники [4]. Далее блок управления был заменен на более миниатюрный, оснащенный переносными источниками энергии. Дизайн и функциональность блока управления претерпели незначительные изменения в ходе эволюции систем вспомогательного кровообращения. Основные изменения в первую оче-