

Конструкции микротеплообменников криогенных систем для охлаждения маломощных электронных устройств

Д-р техн. наук А.М. АРХАРОВ, канд. техн. наук Е.В. ДИЛЕВСКАЯ, С.И. КАСЬКОВ, канд. техн. наук Ю.А. ШЕВИЧ
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

The designs of wound micro heat exchangers made from finned capillary tubes for throttle cryogenic systems, working at 4,5...80 K are considered. The advantages of heat exchangers, where the tube is wound on the core in one or several rows are presented. The versions of two-cascade and three-cascade designs of micro heat exchangers are given, and the characteristics of a helium three-cascade microliquefier are presented.

Микроэлектронные устройства, входящие в состав различных приборов и систем, используются в самых различных областях техники. Элементы этих устройств имеют малые мощности тепловыделений ($0,5\ldots1,5$ Вт) и малые габаритные размеры ($D=9\ldots10$ мм, $H=30\ldots50$ мм). Для обеспечения высокой чувствительности необходимо их охлаждение с последующей термостабилизацией при $T=4\ldots80$ К в зависимости от типа и условий эксплуатации.

С этой целью была создана серия микрокриогенных систем, основанных на различных принципах: дроссельные системы на основе эффекта Джоуля – Томсона, системы на основе турбодетандеров, газовые холодильные машины на базе цикла Стирлинга и др., описанные в работах [1, 2, 6]. Среди них широкое распространение получили дроссельные системы охлаждения, отличающиеся высокой надежностью, удобством стыковки с охлаждаемыми объектами, малым временем выхода на заданный температурный режим, возможностью удалить теплообменники от компрессора, отсутствием вибраций, большим ресурсом, возможностью достижения температуры 4,5 К.

Одним из основных узлов этих систем, определяющих их эффективность, а следовательно, габариты и энергопотребление являются микротеплообменники, которые размещаются в общем криостате с охлаждаемым элементом. По своей сути и назначению они представляют собой охладители, что обеспечивается наличием дросселя на их холодном конце.

Для указанных выше микрокриогенных систем используют теплообменники разных типов:

- ✓ витые из оребренных капиллярных трубок;
- ✓ планарные из набора тонких пластин, образующих щелевые микроканалы;
- ✓ из перфорированных пластин или сеток.

Авторы занимались разработкой, изготовлением, испытаниями и исследованиями микротеплообменников с первых шагов развития микрокриогенной техники. Был получен большой объем данных и результатов, представляющих научный и практический интерес [2 – 4, 6 – 8].

На сегодняшний день эти работы по разным причинам становятся малодоступными. В то же время в связи с последними достижениями в микроэлектронике приведенные в них данные могли бы найти применение при разработке микротеплообменников нового поколения, а также при создании теплоотводов на плюсовые уровни температур.

Прежде всего речь идет о неординарных конструкциях, составленных из элементов, имеющих размеры менее 1 мм, а также об оригинальных конструктивных и технологических приемах, используемых при изготовлении теплообменников (например, навивка оребрения из тонкой проволоки диаметром $0,1\ldots0,2$ мм на капиллярные трубы диаметром $0,3\ldots0,5$ мм с креплением методом диффузийной сварки или припаивания; разработка узла подохлаждения основного хладагента вспомогательным на уровнях 80...20 К и др.).

Эти данные могут быть полезны инженерам-теплофизикам и специалистам, занимающимся разработкой современной электронной аппаратуры, лазерной техники, разработчикам криохирургических уст-

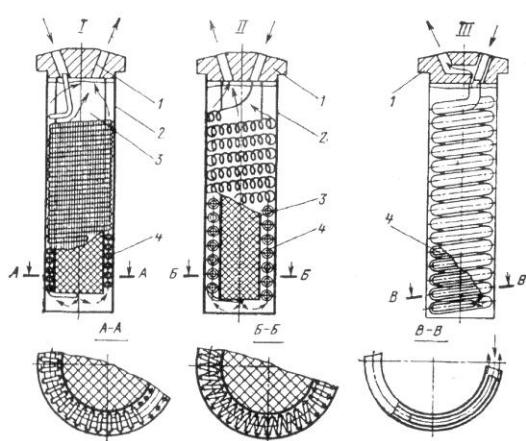


Рис. 1. Принципиальные схемы основных типов витых микротеплообменников:

I – аналог теплообменника Хемпсона; II – аналог теплообменника Паркинсона; III – аналог теплообменника Линде; 1 – штуцер; 2 – обмотка; 3 – сердечник; 4 – трубы

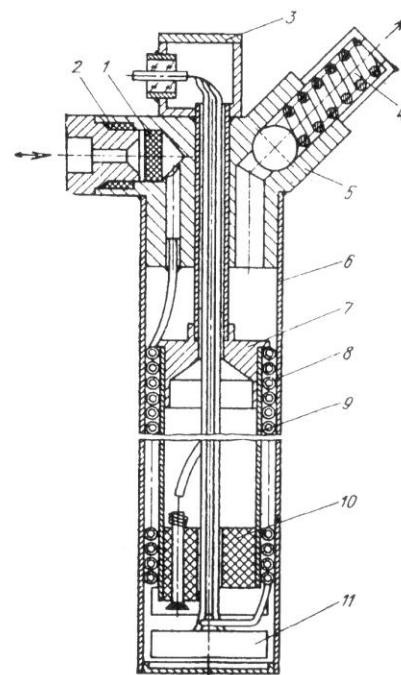


Рис. 2. Микротеплообменник установки разомкнутого типа на температурный уровень 80 K:

1 – титановый фильтр; 2 – прокладка; 3 – узел гермовыводов; 4 – пружина; 5 – штуцер; 6 – обечайка; 7 – втулка; 8 – трубы; 9 – сердечник; 10 – держатель; 11 – датчик температуры

ройств и учёным при выполнении исследований в условиях низких температур.

В соответствии с изложенным авторы находят целесообразным публикацию серии статей, посвященных различным типам микротеплообменников и их конструкций.

В данной статье будут рассмотрены витые микротеплообменники из оребренных капиллярных трубок, комплектующие дроссельные криогенные системы на температурные уровни 4,5...80 K.

Микрообменники-охладители представляют собой миниатюрные теплообменные аппараты витого типа с противоточным движением хладагента. Прямой поток движется по капиллярным трубкам, обратный – в межтрубном пространстве. Наружный диаметр никелевых трубок 0,31...0,45 мм, толщина стенок 0,05 мм (в некоторых случаях диаметр трубок достигает 0,55...0,75 мм). В качестве оребрения используется медная проволока диаметром 0,1...0,25 мм, припаиваемая к трубкам или плотно навиваемая на них (первый способ предпочтительнее). Давление прямого потока составляет 20 МПа, обратного – 0,1 МПа.

По способу организации теплопередающей поверхности различают три типа витых теплообменников (рис. 1):

I – трубка в один или несколько рядов навивается на сердечник (аналог теплообменника Хемпсона);

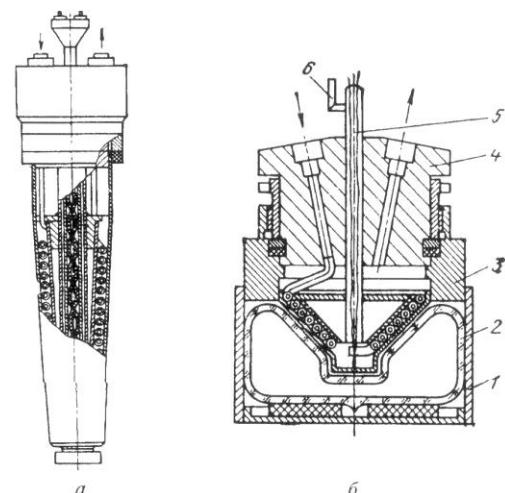


Рис. 3. Микротеплообменники, имеющие конфигурацию конуса:

а – теплообменник с малым углом β ; б – конусный теплообменник с криостатом; 1 – корпус криостата; 2 – вакуумная колба; 3 – фланец криостата; 4 – штуцер теплообменника; 5 – трубка для ввода термопары; 6 – трубка отбора давления

II – перед навивкой на сердечник трубке придается форма спирали (прототип – теплообменник Паркинсона);

III – теплообменник «труба в трубе» (прототип – теплообменник Линде).

Конечно, конструктивно микротеплообменники в силу своих чрезвычайно малых размеров значительно отличаются от указанных прототипов.

В теплообменниках III типа «труба в трубе» коэффициенты теплоотдачи высоки как в прямом, так и в обратном потоках, что обусловлено турбулентным течением газа в трубках и кольцевых зазорах. Это обеспечивает малую величину недорекуперации (разность температур потоков на теплом конце теплообменника), что обуславливает малые потери холода в системе. Однако потери давления на трение в каналах в этих аппаратах довольно велики, в связи с чем полу-

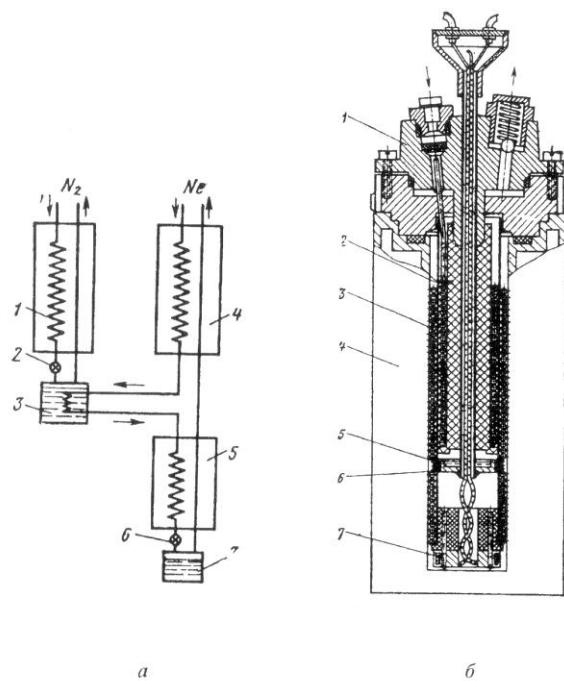


Рис. 4. Теплообменники двухкаскадной установки для получения температур 20...30 К:
а – принципиальная схема теплообменника: 1 – азотный теплообменник; 2, 6 – дроссели азотного и неонового каскадов; 3 – испаритель (для подохлаждения неона); 4, 5 – предварительный и основной неоновые теплообменники; 7 – сборник жидкого неона;
б – конструкция теплообменника: 1 – штуцер; 2 – воздушная секция; 3 – неоновая секция; 4 – криостат; 5 – емкость с жидким азотом; 6 – змеевик подохлаждения неона; 7 – термодатчик

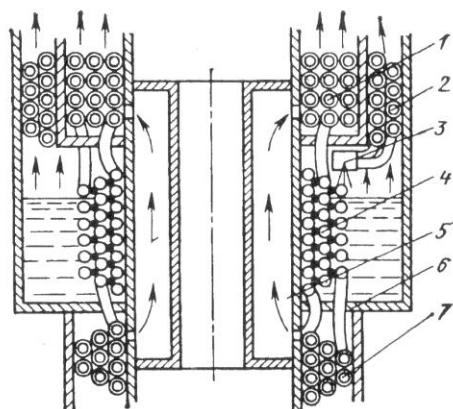


Рис. 5. Узел непосредственного охлаждения основного хладагента вспомогательным для двух- и трехкаскадных теплообменников:

1 – предварительный теплообменник основного хладагента; 2 – теплообменник вспомогательного хладагента; 3 – дроссель; 4 – змеевик подохлаждения основного хладагента; 5 – канал для отвода обратного потока газа основного хладагента; 6 – корпус подохладителя; 7 – дроссельный теплообменник основного хладагента

чить температуру охлаждения объекта, близкую к температуре кипения азота при нормальных условиях, практически невозможно. Кроме того, высокие потери давления приводят к энергетическим затратам, которые нивелируют выгоду от малой недорекуперации.

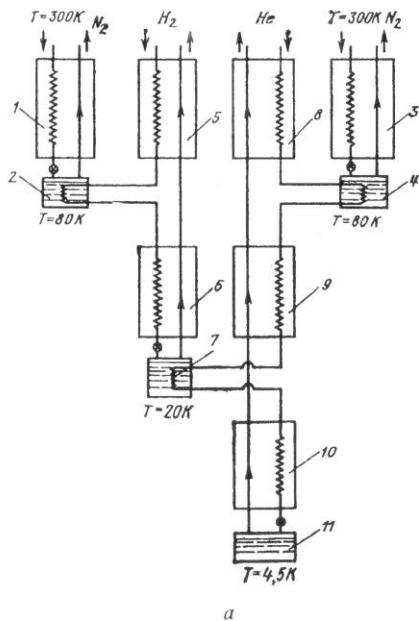
Этого недостатка лишены теплообменники I и II типов, в которых обратный поток газа движется в межтрубном пространстве, имеющем большую площадь проходного сечения, и непосредственно омыает охлаждаемый элемент. Но теплообменники II типа с самой большой площадью свободного сечения и соответственно очень малым гидравлическим сопротивлением имеют наибольшую величину недорекуперации из всех трех рассматриваемых типов.

Наилучшим вариантом можно считать теплообменники I типа (рис. 2), имеющие следующие положительные особенности:

✓ большая маневренность в выборе геометрических параметров для заданных условий функционирования;

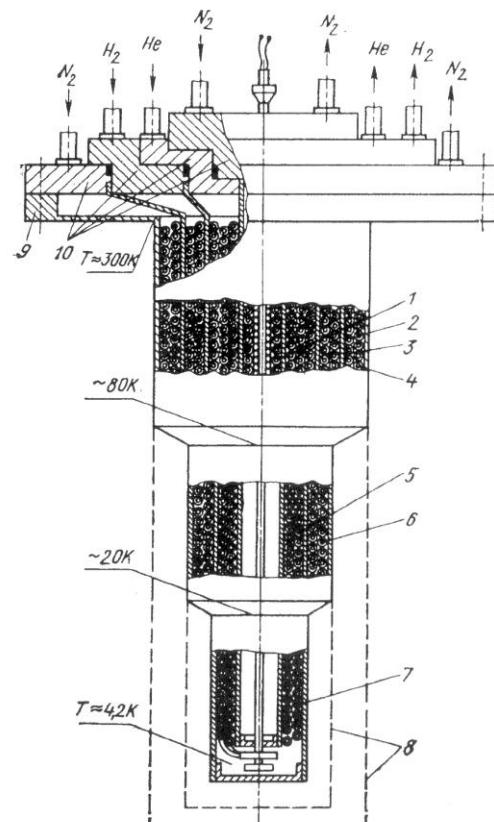
✓ относительно высокая эффективность и, следовательно, малые потери холода;

✓ минимальное термическое сопротивление между



a

Рис. 6. Трехкаскадный теплообменник-ожижитель для получения температуры $4,2\text{ K}$: а – принципиальная схема теплообменника: 1 – азотный теплообменник для охлаждения водорода; 2, 4 – азотные ванны; 3 – азотный теплообменник для охлаждения гелия; 5, 6 – водородные теплообменники; 7 – змеевик подохлаждения гелия водородом; 8, 9, 10 – гелиевые теплообменники; 11 – емкость для сбора жидкого гелия; б – конструкция теплообменника: 1, 4 – азотные теплообменники; 2, 5 – водородные теплообменники; 3, 6, 7 – гелиевые теплообменники; 8 – радиационные экраны; 9, 10 – фланцы



б

охлаждаемым элементом и парожидкостной смесью хладагента, выходящего из дроссельного отверстия, расположенного на последнем витке теплообменника;

✓ относительная простота технологии изготовления в сравнении с двумя другими типами конструкций;

✓ возможность обеспечения короткого пускового периода (времени достижения заданной температуры охлаждения);

При необходимости обеспечения пускового периода в несколько секунд конструкция этих теплообменников претерпевает некоторые изменения (рис. 3). Им придается конфигурация конуса, что позволяет поддерживать постоянную скорость газа по высоте теплообменника, уменьшить его массу (а следовательно, теплоемкость конструкций), осуществить равномерную плотную посадку теплообменника в обечайке, т.е. достичь хорошей организации потока газа относительно теплопередающей поверхности.

Величина угла при вершине конуса β (удвоенный угол наклона образующей относительно вертикальной оси теплообменника) может меняться от 15 до 90° .

Разработка теплообменников с $\beta = 15$ и 45° трудности не вызывает. Иначе обстоит дело в случае $\beta = 90^\circ$. При одинаковой величине поверхности теплообмена такой аппарат имеет массу, в $1,5$ раза меньшую, чем при $\beta = 15^\circ$, но в 5 раз большие потери в окружающую среду за счет теплопроводности сердечника. Кроме того, значительно возрастает теплоприток к криостату (примерно в 3 раза). Поэтому применение теплообменников с $\beta = 90^\circ$ для замкнутых криогенных систем нецелесообразно, так как их холодопроизводительность соизмерима с теплопритоками. Использование таких теплообменников рационально в разомкнутых системах, в которых для получения периода пуска, измеряемого секундами, достигается хо-

Таблица 1
Геометрические характеристики трехкаскадного микротеплообменника

Теплообменники	D, мм	H, мм	d _c , мм	d _{tp} , мм	d _p , мм	t _p , мм	n	n ₁	n ₂
Азотный для предварительного охлаждения:									
гелия	15,4	90	12,3	0,45	0,2	0,4	2	2	1
водорода	34,6	90	30,7	0,45	0,3	0,8	5	2	3
Водородный для охлаждения гелия	30,6	100	25,5	0,75	0,3	1	4	2	2
Водородный дроссельный	30,6	90	25,5	0,75	0,3	0,7	4	2	2
Гелиевый:									
предварительный	25,2	100	15,7	0,85	0,4	1	6	3	2
основной	25	90	20,7	0,75	0,2	0,7	6	2	3
дроссельный	16	100	11,7	0,75	0,2	0,7	6	2	3
Примечание. D – диаметр теплообменника, H – высота трубки, d _c – диаметр сердечника, d _{tp} – диаметр трубы, d _p – высота трубы, t _p – шаг обретения, n – число трубок, n ₁ – число рядов, n ₂ – число заходов.									

лодопроизводительность, значительно превышающая теплопритоки.

Температуру охлаждения 20...30 К получают в так называемых двухкаскадных криогенных системах с двумя циклами, в каждом из которых циркулирует свой хладагент и имеется отдельный компрессор. В первом каскаде основной хладагент предварительно охлаждается до температуры ниже инверсионной, во втором – до уровня, обеспечивающего заданную температуру охлаждения электронного элемента. В соответствии с этим микротеплообменники представляют собой двухкаскадные аппараты, состоящие из нескольких теплообменников. Схема и конструкция одного из возможных вариантов охладителей на температурный уровень 20...30 К показана на рис.4. В данном случае в качестве основного хладагента используются водород ($T_{\text{охл}} = 20 \text{ K}$) или неон ($T_{\text{охл}} = 29...30 \text{ K}$), а для предварительного охлаждения – азот ($T_{\text{охл}} = 80 \text{ K}$).

В таких конструкциях очень важное значение имеет организация подохлаждения основного хла-

дагента перед его дросселированием. Оригинальная конструкция узла подохлаждения показана на рис. 5.

Охлаждение микроэлектронных устройств до температуры 4,5 K достигается путем применения трехкаскадных систем и соответственно трехкаскадных микротеплообменников-ожижителей. Конструкция такого аппарата представлена на рис.6. Он состоит из семи теплообменников и трех подохладителей, образующих в совокупности трехкаскадный микроожижатель, в котором в качестве основного хладагента используется гелий, охлаждаемый ниже инверсионной температуры водородом, который, в свою очередь, охлаждается азотом. Геометрические характеристики и параметры гелиевого микроожижителя представлены в табл. 1 и 2.

В конструктивном отношении трехкаскадный микротеплообменник-ожижатель представляет собой аппарат, скомпонованный таким образом, что гелиевые теплообменники экранированы водородными, которые, в свою очередь, экранированы азотным. Внутри верхнего гелиевого теплообменника помещен азотный для предварительного охлаждения гелия. Сердечник гелиевого теплообменника является одновременно обечайкой азотного. На обечайки гелиевых теплообменников навиты трубы водородных, а на обечайку водородного навит наружный азотный теплообменник, служащий для подохлаждения водорода. Такая компоновка позволяет сократить теплоприток излучением к гелиевой и водород-

Таблица 2
Параметры гелиевого микроожижителя

Контур	Давление на входе, МПа	Давление на выходе, МПа	Расход, м ³ /ч
Азотный	19,2...21	0,1...0,14	5,6...6,2
Водородный	14...15,5	0,11...0,14	6,7...7,9
Гелиевый	1,8...1,9	0,1...0,14	5,1...6

ной зонам, а также обеспечивает удобство сборки и демонтажа.

Для защиты основного гелиевого, а также нижнего водородного теплообменников от излучения служат экраны, представляющие собой тонкостенные полированные цилиндры из коррозионно-стойкой стали. Наружный экран припаян к азотной ванне, т.е. имеет в среднем температуру жидкого азота, второй экран – к водородной ванне (имеет температуру жидкого водорода), благодаря чему теплоприток излучением из окружающей среды к основному гелиевому теплообменнику сведен к пренебрежимо малой величине.

Охижитель помещен в специальный криостат, представляющий собой цилиндрический стеклянный сосуд Дюара с посеребренными стенками. Криостат находится в металлическом кожухе с фланцем, по периметру которого производится уплотнение.

Все сердечники и обечайки выполнены из нержавеющей стали и имеют толщину стенок 0,1...0,15 мм, что позволяет сократить осевую теплопроводность. Теплообменники изготовлены из никелевых трубок $d=0,45\ldots0,75$ мм, спирально оребренных медной проволокой. Для снижения температурных напоров змеевики подохлаждения находятся непосредственно в полостях (ванночках) с жидким хладагентом (рис. 5).

В заключение необходимо отметить, что в рамках одной статьи невозможно осветить все вопросы, связанные с конструированием микротеплообменников-ожижителей. Приведенные в статье конструкции являются только некоторыми из возможных вариантов. Могут быть и другие, как показано в работе [1]. Например, в двух- и трехкаскадных микроожижителях азотные подохлаждающие теплообменники могут выполняться по схеме «труба в трубе» и т. д.

Вопросы конструирования непосредственно связаны с задачами теплового и гидравлического расчетов микротеплообменников. Общая методика расчета имеет по сути классический характер. Это выполнение расчета коэффициентов теплоотдачи и потерь давления в прямом и обратном потоках и определение коэффициента теплопередачи с последующим нахождением необходимой поверхности теплообмена. Но расчеты теплообмена и гидравлического сопротивления в каналах микротеплообменников выполняются по закономерностям, найденным именно

для них. Эти данные изложены в работах [2 – 5], где показано, что расчет течений в капиллярных трубках (прямой поток) можно выполнять по уравнениям, приведенным в работе [5]. С целью получения данных для расчетов в условиях обратного потока были выполнены специальные исследования, результаты которых приведены в [2 – 4]. Особенностью исследований является то, что они выполнены в натурных условиях, при высоких давлениях, низких температурах и геометрии, соответствующей размерам микротеплообменников, что обеспечило максимальную адекватность результатов условиям функционирования микротеплообменников.

Список литературы

- Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника. – М.: Машиностроение, 1977.
- Дилевская Е.В. Криогенные микротеплообменники. – М.: Машиностроение, 1978.
- Дилевская Е.В., Каськов С.И., Станкевич И.В., Шевич Ю.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена и гидродинамики при течении газа в микроканалах устройств для охлаждения электронных приборов // Труды IV Национальной Российской конференции по тепломассообмену, Москва, МЭИ, 23 – 27 октября 2006 г.]
- Дилевская Е.В., Каськов С.И., Станкевич И.В., Шевич Ю.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена и гидродинамики в теплообменниках с микроканалами сложных форм // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение, 2007, № 1.
- Дыбан Е.П., Швец И.Т. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и теплообмена при течении воздуха в капиллярных каналах // Известия АН СССР, отд. тех. наук. № 2. 1956.
- Криогенные системы. Т. 2 /Под ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. – М.: Машиностроение, 1999.
- Шевич Ю.А., Даниленко Т.К., Соколов Н.А. и др. Исследование характеристик теплообменных поверхностей планарных микрорефрижераторов // Труды МГТУ № 554. «Криогенная техника и кондиционирование», 1991.
- Шевич Ю.А., Даниленко Т.К., Могарычный В.И. Экспериментальное исследование микрорефрижераторов планарного типа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение, 2001.