

УДК 621.318.51

СТРУКТУРЫ М-Г-Д-М С ПОДВИЖНЫМИ ПЛЕНКАМИ

В.Л.Дятлов, В.В.Коняшкин, Б.С.Потапов

1. Введение

В пленочной электромеханике используются два вида емкостных структур с подвижными пленками: металл-газ-металл (М-Г-М) [1] и металл-газ-диэлектрик-металл (М-Г-Д-М)^{*)} [2,3]. В этих структурах в результате изгиба происходит движение подвижных пленок приблизительно перпендикулярно своим плоскостям. При этом изменяется толщина заполненных газом промежутков, т.е. изменяется емкость структур. Движение пленок структур, которое может быть передано на внешнюю механическую нагрузку, наряду с изменением емкости является основой преобразования электрической энергии в механическую работу, и наоборот. Таким образом, рассматриваемые структуры по особенностям электромеханического преобразования энергии аналогичны классическим электрическим машинам с рабочими зазорами переменной толщины, т.е. емкостным машинам с механическим контактом ротора и статора [4], электромагнитам и индуктивным машинам с качающимся ротором^{*)} [5].

В емкостных М-Г-М-структурах изоляция между металлами однородна, благодаря чему они обладают высокой электрической стабиль-

^{*)} Поясним: в М-Г-Д-М-структуре либо первый металл – подвижная металлическая пленка, а твердый диэлектрик и второй металл – неподвижный металлический электрод, покрытый диэлектрической пленкой; либо первый металл – неподвижный металлический электрод, а твердый диэлектрик и второй металл – подвижная металлизированная диэлектрическая пленка.

^{*)} Сохранены названия, используемые в оригинальных работах [4,5].

ностью. Для нормального функционирования таких структур необходимо обеспечить условия, исключающие касание металлических разнотипных заряженных поверхностей. Но при таких условиях трудно достичь большого изменения емкости, т.е. высокой энергетической эффективности. Поэтому М-Г-М-структуры находят применения в областях техники, где энергетическая эффективность не играет большой роли, например, при создании матриц мембранных модуляторов света для широкоэкранных телевизионных установок или установок ввода данных в ЭВМ [1], при создании мембранных зеркал телескопов с управляемо-подвижной поверхностью [6].

В емкостных М-Г-Д-М-структурах допустимо соприкосновение (контакт) поверхностей металла и диэлектрика, и это, с одной стороны, упрощает вопросы конструирования энергетически эффективных пленочных электромеханических устройств с большим изменением емкости, в том числе универсальных двигателей и генераторов [7]. Но, с другой стороны, контакт твердого диэлектрика с металлом приводит к таким физическим, не имеющим места в М-Г-М-структурах явлениям, как накопление остаточных зарядов на границе раздела газ-твердый диэлектрик и в объеме твердого диэлектрика, и адгезия металла и диэлектрика в местах их контакта. Остаточные заряды и адгезия — факторы, вызывающие нестабильность в работе пленочных емкостных структур с подвижными пленками. Поэтому перспективы применения пленочных емкостных М-Г-Д-М-структур или, по существу, пленочной электромеханики оказались в прямой зависимости от решения задачи ограничения влияния остаточных зарядов и адгезии при больших значениях электрического поля в газовых промежутках — рабочих зазорах.

Известно [8], что в пленочных емкостных структурах с подвижными пленками благодаря малым толщинам диэлектрических пленок достигимы более высокие электрические поля, чем в классических емкостных машинах. Поэтому энергоемкость пленочных структур выше, чем энергоемкость классических емкостных и даже индуктивных машин.

Макетирование пленочных электростатических индикаторов, основными конструктивными элементами которых являются М-Г-Д-М-структуры, показало [9-11], что эти устройства могут длительное время работать от переменного напряжения без заметного изменения электромеханических характеристик при максимальном значении электрического поля в газовых промежутках (сухой воздух при нормальном давлении) до $1,5 \cdot 10^8$ в/м (при этом значение поля в пленке из полиэти-

лентерефталата составляет $5 \cdot 10^7$ в/м). Величина поля, достигаемая в рабочем зазоре классических электростатических машин [4], значи- тельно меньше указанного значения (в машине Трампа - 10^7 в/м; в ма- шине А.Ф.Иоффе - $1,5 \cdot 10^7$ в/м; в машине Феличи - $6,2 \cdot 10^7$ в/м). Но эти результаты дают лишь качественное представление о работоспособности М-Г-Д-М-структур с подвижными пленками.

Для получения количественных характеристик требуется создать экспериментальные методики исследований основных электромеханических свойств М-Г-Д-М-структур с подвижными пленками, позволяющие установить предельные значения электрических полей. Начало созда- ния таких методик было положено в работе [3]. Целью настоящей ра- боты является дальнейшее развитие этих методик.

2. Емкостные М-Г-Д-М-структуры с накатом и волнообразной деформацией подвижных пленок

Можно выделить два типа энергетически эффективных М-Г-Д-М-структур, в которых в результате контакта поверхностей металла и твердого диэлектрика достигается большое изменение емкости, струк- туру с накатом и структуру с волнообразной деформацией подвижных пленок.

Структура с накатом (рис.1,а) содержит подвижную пленку 1 и неподвижный электрод 2, покрытый диэлектрической пленкой. Подвиж- ная пленка 1 частично соприкасается с диэлектрической пленкой. К концу подвижной пленки при- креплено некоторое тело 3, слу- жащее для суммирования сил. Его можно назвать коллектором (в индикаторах [9-11] роль этого тела выполняет сама под- вижная пленка, изогнутая в ви- де петель различной формы). На рис.1,а подвижная пленка 1 ус- ловно изображена с неровнос- тями. Это сделано для того, чтобы подчеркнуть, что в кон- тактных М-Г-Д-М-структурах эф- фективное электростатическое взаимодействие происходит на весьма малых расстояниях, при

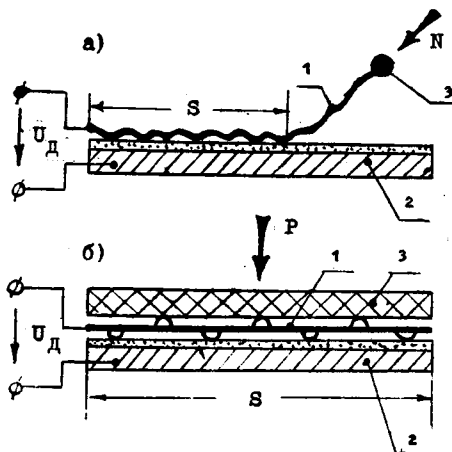


Рис.1

которых необходимо учитывать неровности пленок и электродов.

При подключении структуры с накатом подвижной пленки к источнику напряжения под действием электростатических сил увеличивается площадь контакта подвижной пленки с противозлектродом. При этом на коллектор действует сила и совершается механическая работа (двигатель). Если электрическое напряжение отлично от нуля и цепь структуры разомкнута, а сила, действующая на коллектор, приводит к уменьшению площади контакта, то электрическая энергия, накопленная в емкости структуры увеличивается. Эта энергия частично может быть передана в электрическую цепь (генератор).

Структура с волнообразной деформацией подвижной пленки (см. рис. I, б) содержит подвижную пленку 1, неподвижный электрод 2, покрытый диэлектрической пленкой, и коллектор 3.

Изображенная на рис. I, б структура - пример структуры с волнообразным изгибом подвижной пленки 1. Последняя имеет прослойки из изолирующего материала, скрепленные с пленкой так, что места скреплений по верхней поверхности пленки не совпадают с местами скреплений по ее нижней поверхности, т.е. рассматриваемая структура имеет один слой многослойной структуры пленочного электростатического двигателя [7]. Процессы в многослойных структурах с волнообразным изгибом пленок принципиально ничем не отличаются от процессов в однослойных структурах.

Если структура с волнообразной деформацией подключена к источнику напряжения при силе, действующей на коллектор равной нулю, то происходит изгиб подвижной пленки под действием электростатических сил (первый такт двигателя), в результате которого в структуре накапливается механическая энергия. При напряжении, равном нулю, эта механическая энергия частично преобразуется в механическую работу (второй такт двигателя).

Если предварительно сжатую внешней силой структуру подключить к источнику напряжения, то она запасает некоторое количество электрической энергии (первый такт генератора). При разрыве электрической цепи и уменьшении внешней силы до нуля подвижная пленка распрямляется и электрическая энергия в емкости структуры увеличивается. Эта энергия частично может быть передана в электрическую цепь (второй такт генератора).

Структура с волнообразной деформацией пленки может быть использована в качестве аккумулятора энергии. В отли -

ние от обычного конденсатора эта структура накапливает энергию не только в виде электрической энергии конденсатора, но и в виде механической энергии изгиба подвижной пленки. Эта механическая энергия, будучи преобразованной в электрическую, может быть передана в электрическую цепь, как и электрическая энергия конденсатора.

Рассмотренные выше режимы работы М-Г-Д-М-структур с волнообразным изгибом в качестве двигателя, генератора и аккумулятора удобны при экспериментальных исследованиях структур для установления предельных значений электрического поля.

3. Электромеханическое преобразование энергии в М-Г-Д-М-структурах с подвижными пленками

Как у классических емкостных машин [4], основной характеристикой электромеханического преобразования энергии рассматриваемых структур является зависимость заряда Q от электрического напряжения на структуре U и от емкости структуры C . В рассматриваемом случае необходимо также учитывать действие усредненного электростатического напряжения, связанного с накоплением остаточных зарядов в диэлектрике [2,3]. Из соотношений для электрических полей, используемых в теории электретов [12], следует равенство

$$\sigma = c_0 (U + u_3), \quad (1)$$

где σ - плотность заряда на металлических обкладках; u_3 - электростатическое напряжение; $c_0 = \frac{\epsilon_0}{d_1/\epsilon + d_e}$. Здесь d_1 , ϵ - толщина и диэлектрическая постоянная диэлектрической пленки соответственно; d_e - толщина зазора между металлической обкладкой и поверхностью диэлектрической пленки - электрета; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м. Это равенство используется при $d_e = \text{const}$. Если считать зазор d_e переменным, то, интегрируя левую и правую части (1) по площади каждого контакта S (см. рис. 1), получаем

$$Q = C \cdot (U + U_3), \quad (2)$$

где

$$Q = \int_S \sigma ds; \quad C = \int_S c_0 ds; \quad U_3 = \frac{\int_S c_0 u_3 ds}{\int_S c_0 ds}.$$

Наконец, разделив левую и правую части (2) на S , получим

$$Q_0 = c_0 \cdot (U + U_3), \quad (3)$$

где $q_0 = Q/S$ - заряд на единицу площади кажущегося контакта подвижной пленки и $c_0 = C/S$ - емкость на единицу площади кажущегося контакта подвижной пленки. Из (2) и (3) видно, что усредненное электростатическое напряжение суммируется с напряжением U , т.е. на структуры действует напряжение $U_d = U + U_0$. При постоянных значениях u_0 по площади кажущегося контакта, т.е. при $U_d = u_0$, локально действует напряжение $U_d = U + U_0$ и $C = C(U_d)$, $C_0 = C_0(U_d)$. Если же u_0 зависит от координат площади кажущегося контакта, то зависимости емкостей от действующего напряжения можно рассматривать как некоторое приближение.

Зависимости $Q = C(U_d) \cdot U_d$ и $Q_0 = C_0(U_d) \cdot U_d$ позволяют рассматривать энергетические соотношения для структур, работающих в указанных режимах двигателя, генератора, аккумулятора, аналогично тому, как это рассматривается, например в электромагнитах [13] (Q - соответствует потоку сцепления Ψ , а U_d - току i).

На рис.2 приведены диаграммы, показывающие процесс электро - механического преобразования энергии на основе характеристик $Q =$

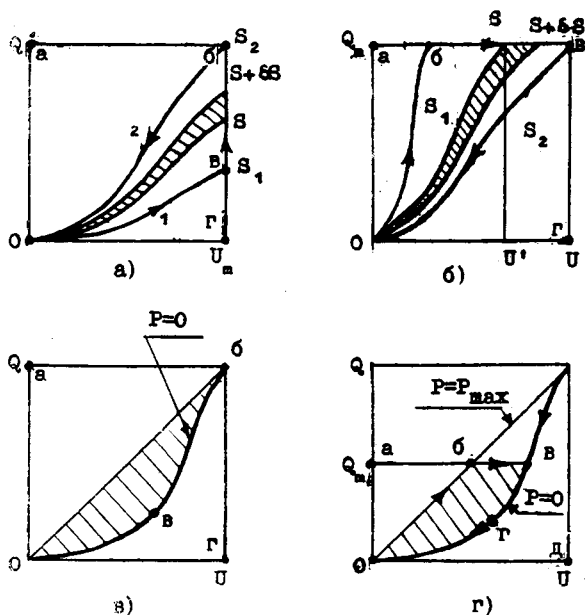


Рис.2

$= C(U)U$ для структур с нака- том и $Q = C(U, P) \cdot U$ для структур с волнообразной деформацией подвижных пленок, где P - сила, действующая на коллектор в структурах с волнообразной деформацией пленок (принято $P > 0$, если она направлена вниз, см. рис.1,б). В связи с тем, что при $U_0 \neq 0$ происходит сдвиг характеристик $Q(U)$, $Q(U, P)$ по оси U

на величину U_3 , достаточно рассмотреть эти диаграммы при $U_3 = 0$, чтобы представить их и при $U_3 \neq 0$. Так как энергия, поступающая в структуру из источника или передаваемая в источник из структуры, равна $J_{идт} = J_{удQ}$ и накапливаемая в структуре энергия всегда может быть определена, то, зная зависимости $Q(U)$, $Q(U, P)$ при различных состояниях структуры, можно определить производимые ею электрическую или механическую работы.

На рис.2,а изображена диаграмма электромеханического преобразования энергии для структуры с накатом подвижной пленки, работающей в режиме двигателя (U_m - скачкообразно прикладываемое к структуре напряжение источника; S_1, S_2 - соответственно площади кажущегося контакта в начальный и в конечный моменты времени, $S_2 > S_1$). Первая кривая - это зависимость $Q_1 = S_1 C_0(U) \cdot U$, вторая - это зависимость $Q_2 = S_2 C_0(U) \cdot U$. Площадь $O_{бв}$ - это производимая полезная механическая работа. Площадь $O_{аб}$ - запасаемые электрическая и механическая энергии деформации подвижной пленки в конечный момент времени (при $S = S_2$), которые практически не могут быть использованы. Площадь $O_{вг}$ - это потеря электрической энергии в сопротивлении электрической цепи структуры. Энергия, поступающая из источника, очевидно, соответствует площади $O_{абг}$. На диаграмме хорошо видны соотношения между указанными энергиями и механической работой. Например, запасаемая в структуре электрическая энергия в конечный момент времени больше производимой структурой механической работы и т.д. Если прикладывать к структуре напряжение источника не скачкообразно, а плавно, то потери энергии в сопротивлении электрической цепи структуры будет меньше, чем это соответствует площади $O_{вг}$.

На рис.2,б изображена диаграмма для структуры с накатом в режиме генератора (Q_m - постоянное значение заряда при разомкнутой цепи структуры). Как уже было сказано, при разомкнутой цепи структуры в результате действия силы N на коллектор (рис.1,а) происходит уменьшение площади S от значения S_1 до значения S_2 ($S_1 > S_2$). Площадь $O_{бв}$ - приращение электрической энергии структуры. Площадь $O_{аб}$ - значение электрической энергии в начальный момент времени ($S = S_1$), а площадь $O_{ав}$ - электрическая энергия структуры в конечный момент времени ($S = S_2$).

На рис.2,в изображена диаграмма электромеханического преобразования энергии для структуры с волнообразной деформацией пленки (рис.1,б), работающей в режиме двигателя. Площадь $O_{бв}$ (зашт-

рихована) – накапливаемая механическая энергия, которая частично может быть преобразована в механическую работу. Площадь Oab – накапливаемая в емкости структуры электрическая энергия, которая в режиме двухтактного двигателя теряется. Площадь $Oabv$ – вся накапливаемая в структуре энергия, электрическая и механическая. Диаграмма, изображенная на рис.2, в отражает работу структуры с волнообразной деформацией пленки также и в режиме аккумулятора энергии. Площадь $Oabv$ – запасаемые электрическая (площадь Oab) и механическая (площадь Obv) энергии, а площадь $Ovbg$ – энергия, теряемая в сопротивлении электрической цепи при подключении структуры к скачкообразно нарастающему напряжению U_m . Из проведенных построений видно, что в емкостном аккумуляторе с подвижными пленками запасаемая энергия больше $CU^2/2$.

На рис.2, г изображена диаграмма работы структуры с волнообразной деформацией пленки в режиме генератора. Площадь $Ovbg$ – приращение электрической энергии структуры; площадь Oab – значение электрической энергии перед циклом, соответствующим изменению силы P на коллекторе от $P = P_{\max}$ до $P = 0$ при разомкнутой цепи ($Q_m = \text{const}$).

В структуре с накатом подвижной пленки, работающей в режиме двигателя (рис.2, а), приращение механической работы будет

$$\begin{aligned} \delta A_H &= (\varepsilon + \delta\varepsilon) \int_0^U c_0(u) u du - \int_0^U c_0(u) u du = \\ &= \delta\varepsilon \int_0^{X_m} c'_0(x) dx, \end{aligned} \quad (4)$$

где $x = U^2/2$, $x_m = U_m^2/2$, $c'_0(x) = c_0(\sqrt{2x})$.

Для этой же структуры, работающей в режиме генератора (см. рис.2, б), приращение электрической энергии равно

$$\delta W_H = \delta\varepsilon \int_0^{x'} c'_0(x) dx, \quad (5)$$

где $x' = (U')^2/2$.

Согласно (4) и (5), можно ввести понятия удельной механической работы наката a_H и удельной электрической энергии наката w_H :

$$a_H = w_H = \int_0^{X_m} c'_0(x) dx. \quad (6)$$

В структуре с волнообразной деформацией подвижной пленки, работающей в режиме двигателя и аккумулятора (рис.2, в) накапливаемая энергия

$$W = \int_0^{Q_m} U dQ = Q_m U_m - \int_0^{U_m} Q dU = \frac{Q_m U_m^2}{2} + \left[\frac{Q_m U_m^2}{2} - \int_0^{U_m} Q dU \right]. \quad (7)$$

Первый член в (7) - это электрическая энергия, накапливаемая в емкости структуры, а второй член (в скобках) - это механическая энергия.

Механическая энергия деформации пленки выразится

$$\begin{aligned} w_D &= \frac{Q_m U_m^2}{2} - \int_0^{U_m} Q dU = s \left[c'_0(x_m) x_m - \int_0^{X_m} c'_0(x) dx \right] = \\ &= s \int_0^{X_m} x \cdot d c'_0. \end{aligned} \quad (8)$$

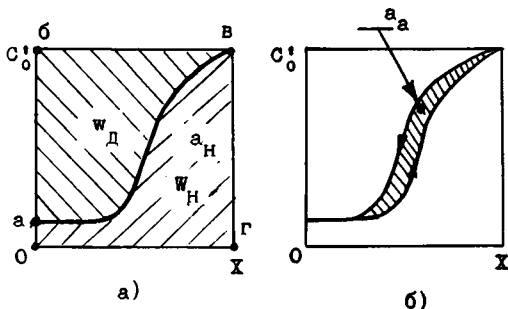


Рис.3

На основе (8) можно ввести понятие удельной механической энергии деформации пленки

$$w_D = \int_0^{X_m} x \cdot d c'_0. \quad (9)$$

На рис.3, а показана характеристика $c'_0(x)$. Из (6) следует, что расположенная ниже кривой площадь Oav_H - удельная механическая работа наката a_H или электрическая энергия наката w_H ; а из (9) следует, что расположенная выше этой кривой площадь abv_D - удельная механическая энергия деформации пленки w_D . Пло-

щадь Обвг - это запасаемая в емкостях структур электрическая энергия, приходящаяся на единицу площади кажущегося контакта. Теперь видно, что чем больше, например, энергия w_d , тем меньше работа a_n , и наоборот. Отсюда становится очевидным ход характеристик $C'_0(X)$ в структурах с накатом и в структурах с волнообразной деформацией подвижных пленок, обеспечивающий высокую энергетическую эффективность каждой из них.

Высокая энергетическая эффективность всех рассматриваемых структур зависит от выполнения еще одного дополнительного условия: величина емкости $C'_0(X_m)$ при $U = U_m$, где U_m - максимально допустимое значение действующего напряжения, должна быть близка к величине $\epsilon\epsilon_0/d_1$ - максимально возможной удельной емкости структур. Выполнение этого условия возможно при применении достаточно тонких подвижных пленок. Поэтому можно говорить о проявлении размерного физического эффекта - механоэлектростатического эффекта - высоком электромеханическом взаимодействии тонких пленок в структурах конденсаторов.

Если известна механическая энергия деформации единицы площади подвижной пленки w_m , соответствующая уменьшению рабочего зазора d_e до нуля, то условие механоэлектростатического эффекта можно сформулировать так: $w_d = w_m$. Для получения аналитического выражения w_m необходимо ввести те или иные параметры, характеризующие неровности пленок в исходном положении, т.е. до деформации. Предположим, например, что неровности подвижной пленки имеют вид сферических куполов с радиусами кривизны R и что эти купола расположены по площади пленки вплотную друг к другу. Если высота куполов, соответствующая максимальному значению рабочего зазора d_e , меньше толщины пленки h (условие развешивающейся поверхности [14]), то (см. [3]) имеет место

$$w_m = \frac{D(1 + \mu)}{R^2}, \quad (10)$$

где $D = E_m h^3/12$ - цилиндрическая жесткость; E_m , μ - соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подвижной пленки.

Удельную энергию деформации пленки можно выразить как долю накапливаемой в емкости структуры удельной электрической энергии

$$w_d = k \cdot C'_0(X_m) \cdot X_m = k \cdot C'_0(U_m) \cdot U_m^2/2, \quad (11)$$

где $k \leq 1$ ($k \approx 0,1$ для структур с накатом и $k \approx 1$ для структур с волнообразной деформацией подвижной пленки).

Из (I0) и (II) следует

$$R = h \sqrt{\frac{E_m (1+\mu) h}{12 k p_{э.с.} \cdot d_1}}, \quad (12)$$

где $p_{э.с.} = \epsilon \epsilon_0 E_m^2 / 2$ - расчетное электростатическое давление; $E_m = U_m / d_1$. Оценки показывают, что $R \approx (I0^2 - I0^3)h$ при использовании пленок как из металлов, так и из металлизированных полимерных материалов.

Формула (12) позволяет провести грубую оценку необходимых неровностей подвижных пленок как естественных, так и искусственно создаваемых. Но из проведенного выше рассмотрения видно, что требования, предъявляемые к величинам необходимых неровностей, можно уточнить в результате рассмотрения экспериментально получаемых характеристик $C'_0(X, P)$, принимая в расчет и максимальные значения этой емкости.

На основе экспериментальных характеристик $C'_0(X, P)$ можно оценить соотношение работы сил трения с полезными работами или энергиями. На рис.3,б показан пример характеристики $C'_0(X)$, получаемой при увеличении и последующем уменьшении величины X . Площадь гистерезиса a_a - это работа сил трения, частично связанная с адгезионными явлениями [3].

Методика экспериментального получения вольтфарадных характеристик $C(U, P)$, по которым в результате пересчета могут быть получены характеристики $C'_0(X, P)$, описана в [15].

4. Методика экспериментального определения силы и работы наката

В работе [3] кратко описана методика измерения сил в М-Г-Д-М-структуре с накатом пленочных лент. В настоящей работе эта методика измерения сил и работы наката описана более подробно.

На рис.4,а показана схема установки для измерения сил в структуре с накатом пленочной ленты (1 - металлизированная полимерная пленочная лента; 2 - плоский монокристаллический электрод; 3 - плоская пружина; 4 - микровинт с контактом для измерений перемещения подвижного конца плоской пружины; α - значение угла между плоскостью электрода и плоскостью непржатого к электроду конца ленты; α_0 -

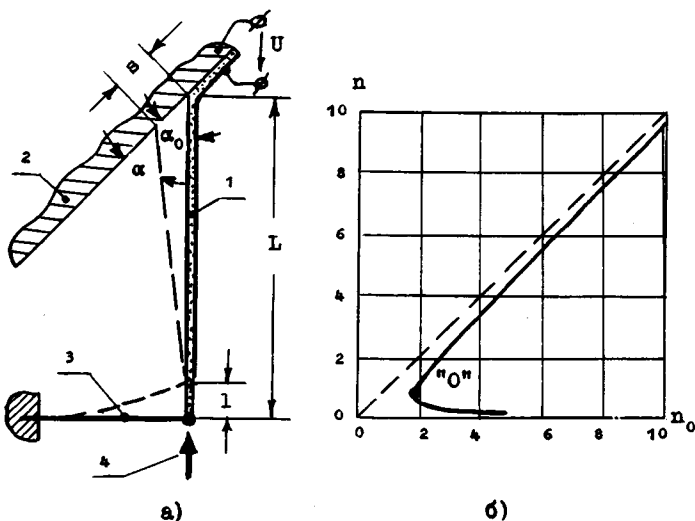


Рис.4

начальное значение угла α ; l - перемещение подвижного конца пружины; s - длина наката пленочной ленты, L - длина ленты).

Приращение работы структуры идет на увеличение энергии изгиба пружины и упругой энергии изгиба пленочной ленты $A_{из.}$, т.е.

$$a_H b \cdot ds = N \cdot b \cdot dl + dA_{из.}, \quad (13)$$

где b - ширина ленты; N - сила, действующая на единицу ширины полимерной ленты. Выражение для упругой энергии ленты $A_{из.} = 2b\sqrt{ND} (1 - \cos \alpha/2)$ следует из решения задачи изгиба заземленной длинной ленты, растягиваемой внешней силой N , которая действует под углом α к плоскости заземления ленты [16].

Связь между величинами s и l следует из решения геометрической задачи, вытекающей из рассмотрения схемы установки

$$l = L - s \cdot \cos \alpha_0 - \sqrt{(L-s)^2 - s^2 \sin^2 \alpha_0}. \quad (14)$$

Целесообразно использовать условие $s \ll L$, при котором из (14) следует, что

$$dl \cong \left[(1 - \cos \alpha_0) + \frac{s}{L} \sin^2 \alpha_0 \right] \cdot ds. \quad (15)$$

При малых a_H длина наката ленты s мала и поэтому, согласно (13) и (15), имеем

$$a_H = N(1 - \cos \alpha_0) + k_{\Pi} \sqrt{\frac{D}{N}} (1 - \cos \frac{\alpha_0}{2}) (1 - \cos \alpha_0). \quad (16)$$

Соотношение (16) путем нормировок можно привести к виду

$$n_0 = n + n^{-1/2}, \quad (17)$$

где $n_0 = N_0/z$; $n = N/z$; $N_0 = a_H/(1 - \cos \alpha_0)$; $z = [k_{\Pi} \sqrt{D}(1 - \cos \alpha_0/2)]^{2/3}$; $k_{\Pi} = dN/dl$ - коэффициент, характеризующий жесткость плоской пружины.

Зависимость n от n_0 показана на рис. 4, 6. Точка "о" на кривой зависимости n от n_0 характеризует пороговое значение $n_0 = 1,89$. Согласно (17), этому пороговому значению соответствует работа наката

$$a_H = 1,89 k_{\Pi}^{2/3} D^{1/3} (1 - \cos \alpha_0) (1 - \cos \alpha_0/2)^{2/3}. \quad (18)$$

При типичных значениях величин, входящих в (18): $h = 4 \cdot 10^{-6}$ м; $E_M = 4 \cdot 10^9$ н/м²; $\alpha_0 = 25^\circ$; $k_{\Pi} = 1,22 \cdot 10^3$ н/м² - пороговое значение $a_H \cong 10^{-3}$ дж/м². Это расчетное значение по порядку величины равно экспериментально получаемым значениям работы наката. Достижимые в эксперименте значения работы наката при больших натяжениях много больше оцененного порогового значения, поэтому наличие порога работы наката в рассматриваемой установке не является ее скольконибудь существенным недостатком. Эта оценка также показывает, что при толщине пленочной ленты до 20 мкм величиной приращения энергии изгиба ленты в (13) можно пренебречь, при этом из (13) и (15) следует, что

$$a_H \cong N \left[(1 - \cos \alpha_0) + \frac{s}{L} \sin^2 \alpha_0 \right]. \quad (19)$$

Из (19) видно, что работа наката может быть определена по измеряемым значениям силы N и длине наката пленочной ленты на электрод s .

Итак, мы имеем два независимых способа определения величины работы наката: по измеряемой емкости C_0' (формула (6)) и по измеряемой силе N (формула (19)).

5. Предельные значения напряжений или напряженностей поля

Известно [17], что в теории надежности конденсаторов ключевым вопросом является установление значений напряжений или напряженностей поля, соответствующих начальным и критическим частичным разрядам. Рабочие напряжения или напряженности поля должны быть меньше критических значений. В случае пленочных конденсаторов методика определения критических разрядов, основанная на измерении параметров случайных импульсов тока, требует чувствительной аппаратуры [17,18]. В случае пленочных механических емкостных структур благодаря факторам движения (силы, перемещения), которые чувствительны к перераспределению зарядов, стало возможным создание более простой методики определения критических напряжений и напряженностей поля. Такую методику можно построить, например, на основе сравнения работы наката, вычисленной по измеряемой емкости (6) и по измеряемой силе наката (19).

На рис.5 показаны характерные зависимости: удельной емкости $C_0(U)$; работы наката $a_H^{(1)}(U)$, вычисленной по измеряемой силе наката; работы наката $a_H^{(2)}(U)$, вычисленной по емкости $C_0'(X)$.

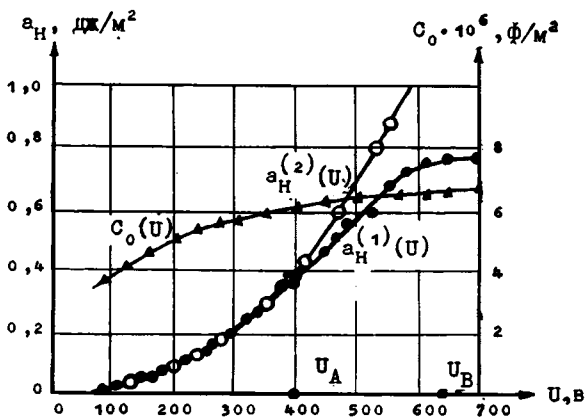


Рис.5

Эти зависимости получены при непрерывном увеличении напряжения в структуре с накатом для металлизированной пленочной ленты из полиэтилентерефталата толщиной 4 мкм в среде элегаза (SF_6) при его давлении 10^5 Н/м^2 . Из рис.5 видно, что до напряжения $U = U_A$ зависимости $a_H^{(1)}(U)$ и $a_H^{(2)}(U)$ практически совпадают. При напряжении $U > U_A$ ход этих зависимостей разный. При напряжении $U = U_B$ рост значений $a_H^{(1)}(U)$ прекращается (насыщение работы наката). При $U > U_B$ постоянство величин $a_H^{(1)}(U)$ сохраняется до выгорания слоя металлизации полимерной ленты. Такие особенности зависимостей $a_H(U)$ характерны для структур, находящихся в средах как элегаза, так и воздуха при их давлении около 10^5 Н/м^2 как при положительной, так и при отрицательной полярности напряжения на слое металлизации. Но в техническом вакууме (давление около 10^{-5} мм Рг) четко фиксируется напряжение $U = U_A$, до которого зависимости $a_H^{(1)}(U)$ и $a_H^{(2)}(U)$ практически совпадают, а насыщения работы наката $a_H^{(1)}(U)$ до выгорания слоя металлизации не происходит.

В табл. I представлены значения U_A ; $E_A = U_A/d_1$; ϵE_A ; $a_H^{(1)} = a_H^{(2)}$ при $U = U_A$; U_B ; $a_H^{(1)}$ при $U = U_B$, полученные в структу -

Т а б л и ц а I

Характеристики зависимостей $a_H(U)$

Г а з	полярность	U_A [в]	E_A [в/м]	ϵE_A [в/м]	$a_H^{(1)} = a_H^{(2)}$ при $U = U_A$ [дж/м ²]	U_B [в]	$a_H^{(1)}$ при $U = U_B$ [дж/м ²]
Воздух, 60%	+	280	$0,70 \cdot 10^8$	$2,10 \cdot 10^8$	0,15	400	0,20
Воздух, 20%	+	300	$0,75 \cdot 10^8$	$2,25 \cdot 10^8$	0,25	420	0,43
Элегаз	+	150	$0,38 \cdot 10^8$	$1,14 \cdot 10^8$	0,05	700	0,60
Элегаз	-	150	$0,38 \cdot 10^8$	$1,14 \cdot 10^8$	0,05	640	0,90
Элегаз	+	300	$0,75 \cdot 10^8$	$2,25 \cdot 10^8$	0,25	660	0,75
Элегаз	+	400	$1,00 \cdot 10^8$	$3,00 \cdot 10^8$	0,40	640	0,75
Вакуум	+	540	$1,35 \cdot 10^8$	$4,00 \cdot 10^8$	0,73	-	-
Вакуум	-	470	$1,18 \cdot 10^8$	$3,50 \cdot 10^8$	0,65	-	-

рах с накатом металлизированных лент из полиэтилентерефталата толщиной $d_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ м в средах воздуха и элегаза при давлении последних 10^5 н/м² и в среде вакуума при давлении 10^{-5} мм рт.ст. Все испытываемые ленты были вырезаны из одного и того же пленочного рулона и перед опытами не подвергались электрической тренировке. В табл. I также указаны полярность на слое металлизации и влажность воздуха.

Из таблицы видно, что в пределах однотипных опытов значения U_A сильно отличаются. Значения же U_B имеют значительно меньший разброс. Значения U_B для среды элегаза приблизительно в 1,6–1,7 раз больше, чем для среды воздуха. Значения работы наката при $U = U_A$ для среды элегаза могут быть как меньше, так и больше таковых для среды воздуха. Значения работы наката при $U = U_A$ в среде технического вакуума в 2–15 раз больше, чем в средах воздуха и элегаза. Хотя из таблицы видно, что полярность на металлизированных полимерных лентах не оказывает заметного влияния на значения характерных напряжений, тем не менее полученных данных еще недостаточно для окончательного вывода.

Расхождение зависимостей $a_H^{(1)}(U)$ и $a_H^{(2)}(U)$ при $U > U_A$ оказалось возможным связать с критическими частичными разрядами.

Если ввести обратные функции $U^{(1)}(a_H)$ и $U^{(2)}(a_H)$, то

$$U^{(2)}(a_H) - U^{(1)}(a_H) \cong U_0, \quad (20)$$

т.е. при каждом разряде, например в газовом промежутке, на поверхности и внутри диэлектрической пленки появляются остаточные заряды, приводящие к возникновению электростатического напряжения. Если предположить, что все эти заряды находятся только на поверхности диэлектрической пленки, то в пределах площади заряжения [3]

$$U_0 = qd_1/\epsilon \cdot \epsilon_0, \quad (21)$$

где q – поверхностная плотность остаточных зарядов. На основе (21) можно оценить величину плотности зарядов q и величины зарядов, возникающих на поверхности диэлектрической пленки при отдельных частичных разрядах. При этом следует отметить, что накат пленочной ленты на неподвижный электрод происходит неравномерно, скачками. Анализ экспериментальных данных показывает, что эти скачки бывают двоякого рода. При скачках первого рода от конца предыдущего скачка до начала следующего напряжение увеличивается на 3–

12 вольт, а величина самих скачков наката составляет 0,4–2 мм (максимальная длина наката – до 60 мм, длина пленочных лент – 390 мм). Эти скачки в движении можно связать с влиянием различных неровностей ленты. При этих скачках не происходит заметного расхождения зависимостей $a_H^{(1)}(U)$ и $a_H^{(2)}(U)$ при напряжении $U \leq U_A$ (скачкам в длине наката соответствуют и скачки значений удельной емкости).

Скачки другого рода возникают при поддержании постоянной величины напряжения питания, при этом длина наката ленты уменьшается на 1–4 мм, а сила наката N или работа наката a_H уменьшаются до значений, которые они имели при напряжении на 10–40 в меньшем напряжения выдержки. Такие скачки происходят при напряжении $U \geq U_A$ (при этом иногда удается заметить искрение на ленте). Эти скачки можно отождествить с отрицательными относительно напряжения питания электретными напряжениями в 10–40 в, возникающими на области ленты, не большей 1–4 мм ее длины. При этом, согласно (21), $q = 6,7 \cdot 27 \cdot 10^{-5}$ к/м² ($d_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ м, $\epsilon = 3$). Если принять, что уменьшение длины наката происходит в результате одного разряда и площадь диэлектрической пленки, равная 1–16 мм², заряжается равномерно, то заряд разряда можно оценить величиной 10^{-10} – 10^{-8} К, что типично для критических частичных разрядов (10^{-10} К и более, см. [17, 18]).

Расхождение зависимостей $a_H^{(1)}(U)$ и $a_H^{(2)}(U)$ дает не общее, а конкретное определение критических напряжений или напряженностей поля.

Насыщение работы наката $a_H^{(1)}(U)$ логично связать с возникновением разряда Пашена в заполненных газом промежутках d_e . Но предварительно следует сделать одно замечание. Согласно проведенным рассуждениям и экспериментальным данным (рис. 5, табл. I), насыщению работы наката $a_H^{(1)}(U)$ всегда предшествуют критические частичные разряды. Возникающие при этом на отдельных участках электретные напряжения уменьшают действующее напряжение по сравнению с напряжением источника питания (гомозаряд). Но это не означает, что на всех участках пленочной ленты возникают электретные напряжения. Поэтому при рассмотрении разрядов Пашена в газовом промежутке можно исходить из предположения действия напряжения U , а не напряжения $U + U_3$.

При $U_3 = 0$, т.е. $q = 0$, напряжение источника равно сумме падений напряжения на диэлектрике пленочной ленты U_1 и напряжения

на промежутке, заполненном газом U_e , $U = U_i + U_e$, где

$$U_i = \frac{U \cdot d_i / \epsilon}{d_e + d_i / \epsilon}, \quad U_e = \frac{U \cdot d_e}{d_e + d_i / \epsilon}.$$

Разряд Пашена наступает в газовом промежутке при $U_e(d_e) = U_{\text{паш}}(d_e)$ и одним значением d_e , где $U_{\text{паш}}(d_e)$ — напряжение начала разряда Пашена, например, при давлении газа 10^5 н/м² [19]. По-

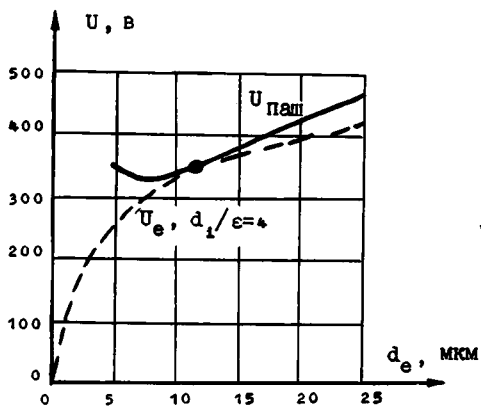


Рис.6

скольку в рассматриваемых структурах с накатом пленочной ленты значения d_e изменяются в широких пределах, то указанное равенство можно графически изобразить как касание кривой $U_e(d_e)$ с кривой $U_{\text{паш}}(d_e)$. Такое графическое построение на рис.6 показано при $d_i = \text{const}$. В результате серии таких построений при разных значениях d_i можно определить зависимость $U(d_i)$.

Зависимость $U(d_i)$

для воздуха при давлении 10^5 н/м² показана на рис.7, где экспериментальные точки (O) — это значения U_B , полученные в структурах с накатом металлизированных пленочных лент из полиэтилентерфталата с толщинами 4,0; 4,4; 6,4; 8,7; 11,6; 12,0; 22 мкм (три ленты толщиной 4 мкм) в среде воздуха при давлении 10^5 н/м² и влажности около 20%. Из этого сопоставления видно, что совпадение значений $U(d_i)$ и U_B достаточно хорошее, чтобы считать $U_B = U(d_i)$.

На рис.7 показаны также экспериментальные точки (+) для $U_A(d_i)$ (пунктирная кривая) и зависимости $\epsilon E_B = \epsilon U_B / d_i$ (сплошная кривая) и $\epsilon E_A = \epsilon U_A / d_i$ (пунктирная кривая). При $U \leq U_A$ электретное напряжение равно нулю, поэтому величины $\epsilon E_A(d_i)$ — это реальные максимальные значения поля в зазоре при его толщине $d_e \rightarrow 0$. Напротив, ϵE_B — это некоторое расчетное значение поля, поскольку при $U = U_B$ напряжение $U_0 \neq 0$. Возрастание значений $\epsilon E_A(d_i)$ при уменьшении d_i означает возможность увеличения рабочего поля

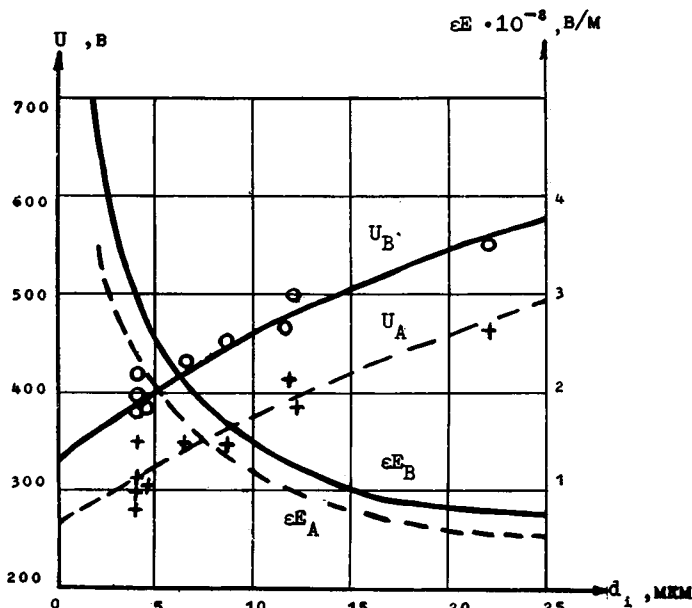


Рис.7

при уменьшении толщин диэлектрических пленок (размерный эффект).

Согласно известным теоретическим представлениям [19], значения $U_{\text{паш}}(d_e)$, а следовательно, и $U(d_1)$ для среды элегаза должны быть больше таких же значений для среды воздуха при одном и том же давлении (10^5 Н/м^2) в $\sqrt{\rho_{\text{SF}_6} / \rho_{\text{возд.}}} = 2,1$ раза (ρ - плот -

ности газов). Как уже было сказано, это увеличение составляет лишь 1,6-1,7 раза (табл. I). Но следует иметь в виду, что при напряжениях 640-700 в напряженность поля в пленках из полиэтилентерефталата толщиной 4 мкм составляет $1,6-1,7 \cdot 10^8 \text{ В/м}$, т.е. близка к пробивным значениям [20].

На рис.8 представлена зависимость $\epsilon E_A(d_1)$, построенная по экспериментальным значениям $U_A(d_1)$, для случая вакуумной среды (давление 10^{-5} мм Нг). Хорошо видна обратно пропорциональная зависимость величины ϵE_A от толщины пленок d_1 (снова размерный эффект).

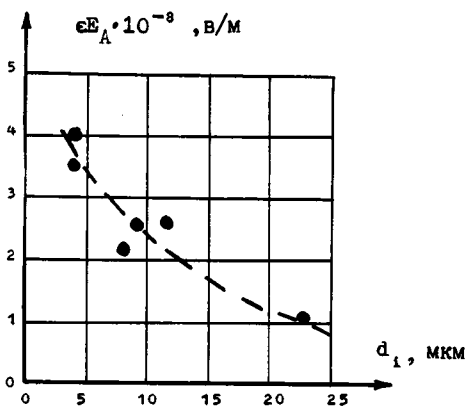


Рис.8

6. Заключение

Рассмотренные в настоящей работе методики исследований М-Г-Д-м-структур с подвижными пленками создают основу определения параметров и оптимизации устройств пленочной электромеханики. С учетом этих методик развиваются и другие важные методики пленочной электромеханики, например, методики определения релаксации силы или работы наката [21]. По существу, релаксация силы или работы

наката отражает релаксацию электростатического напряжения. Несомненно, что рассмотренные методики потребуют своего дальнейшего развития, особенно в направлении автоматизации, и со временем они могут дополнить известные методики изучения свойств диэлектриков.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Т.Г. Левиной и М.М.Одинцовой, предоставивших для наших исследований пленочные материалы.

Л и т е р а т у р а

1. НАТАНСОН Х.С., ГОЛЬБЕРГ Я. Тонкие пленки с топологической структурой в полупроводниковых устройствах. - В кн.: Физика тонких пленок. М., 1978, т.8, с.331-356.
2. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШИН В.В., ПОТАПОВ В.С. Модели пленочных электростатических элементов и стабильность их характеристик. - В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып.66). Новосибирск, 1976, с.3-19.
3. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШИН В.В., ПОТАПОВ В.С. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок. - В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып.64). Новосибирск, 1981, с.33-53.
4. ПОЛОТОВСКИЙ Л.С. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. - 154 с.
5. Электрический двигатель с катящимся ротором /Гусаров О.А., Орлов Н.Г., Мойсеев М.В. Авт.свид. СССР № 342264. - Пол.изобр., 1972, № 19, с.218.

6. OROSSO R.P., YELLIN M. The membrane mirror as an adaptive optical element.- J.Opt.Am., 1977, v.67, N 3, p.399-406.
7. Электростатический двигатель с возвратно-поступательным движением /Дятлов В.Л., Колмогоров А.Б., Коняшкин В.В., Луцет М.К., Потапов Б.С. Авт.свид. СССР № 744877. - Бюл.изобр., 1980, № 24.
8. ДЯТЛОВ В.Л. Пленочная электромеханика - основа создания универсальных пленочных емкостных двигателей с высокой энергоемкостью. - В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып.84). Новосибирск, 1981, с.3-32.
9. Индикатор (варианты его выполнения) /Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Луцет М.К., Потапов Б.С. Авт.свид. СССР № 898494. - Бюл.изобр., 1982, № 2.
10. Индикатор /Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Луцет М.К., Потапов Б.С. Авт.свид. СССР № 911598. - Бюл.изобр., 1982, № 9.
11. Индикатор /Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Луцет М.К., Потапов Б.С., Солдатенков И.С. Авт.свид. СССР № 915094. - Бюл.изобр., 1982, № 11.
12. ГУБЛИН А.Н. Электреты, Электретный эффект в твердых диэлектриках. - М.: Наука, 1978. - 186 с.
13. ТЕР-АКОПОВ А.К. динамика быстродействующих электромагнитов. - М.-Л.: Энергия, 1965. - 167 с.
14. ТИМОШЕНКО С.П., ВОЙНОВСКИЙ-КРИГЕР С. Пластины и оболочки. - М.: ГИЗМЛ, 1963. - 630 с.
15. ПОТАПОВ Б.С. Вольтфарадные характеристики пленочных емкостных структур. - Настоящий сб., с. 24-53.
16. АНДРЕЕВА Л.Е. Упругие элементы приборов. - М.: МАШГИЗ, 1962. - 455 с.
17. КУЧИНСКИЙ Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. - Л.: Энергия, 1973. - 175 с.
18. ЕРМУРАТСКИЙ В.В., ЕРМУРАТСКИЙ П.В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. - М.: Энергия, 1979. - 219 с.
19. МИК Д., КРЭГС Д. Электрический пробой в газах. - М.: ИИЛ, 1960. - 603 с.
20. КОРИЦКИЙ Ю.В. Электромеханические материалы. - М.: Энергия, 1976. - 320 с.
21. КОНЯШКИН В.В. Релаксация сил в пленочных емкостных структурах. - Настоящий сб., с. 54-61.

Поступила в ред.-изд.отд.
24 мая 1982 года