

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ ЛЬДА НА ИМПУЛЬСНОМ НАПРЯЖЕНИИ

*А. В. Астафуров*

(Представлено профессором, доктором Воробьевым А. А.)

В работе излагается методика эксперимента, приводятся вольт-временные характеристики речного льда для толщины 0,5; 1; и 1,5 см в однородном и неоднородном электрических полях при продолжительности экспозиции от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  сек; подсчитана скорость развития разряда, равная  $(2-7) \cdot 10^{-6}$  см/сек.

### Введение

Существенным недостатком многочисленных данных по электрическому пробое твердых диэлектриков, приведенных в опубликованных работах, является то обстоятельство, что исследования вольт-временных характеристик обычно производились на образцах, толщина которых не превышала 1—2 мм. Помимо данных Дрегера [1], Хандрека [2] и Лемхауса [3], получивших вольт-временные характеристики для фарфора и стекла при толщине до 9 мм, большинство закономерностей было получено на образцах толщиной менее 1 мм.

Известно, что при пробое в неоднородных электрических полях с уменьшением толщины диэлектрика возрастает его электрическая прочность, эффект полярности становится исчезающе малым [4]. Представляет научный и практический интерес изучение вольт-секундных характеристик при пробое твердых диэлектриков в больших толщинах.

Сравнение вольт-временных характеристик при пробое газообразных, жидких [5, 6] и твердых диэлектриков поможет выяснить физическую картину электрического пробоя последних.

В качестве твердого диэлектрика в наших опытах применялся речной лед, образовавшийся в естественных условиях.

Как известно, лед имеет довольно высокую электрическую прочность [4], его кристаллическая структура аналогична структуре вюрцита, в котором места атомов цинка и серы занимают атомы кислорода, удерживаемые относительно друг друга четырьмя водородными связями [7].

Для выяснения состава льда был произведен его химический анализ. Пробы брались из двух кусков льда. Объем каждой пробы составлял 5 л. Каждая проба бралась в верхней части льдины, средней и нижней частей. Как видно из табл. 1, плотный остаток льда при  $110^{\circ}\text{C}$  составляет от 6,2 до 7 мг/л. По данным кафедры аналитической химии Томского политехнического института, плотный остаток в дистиллированной воде однократной дистилляции составляет до 9 мг/л.

### Методика эксперимента

Для получения импульсов высокого напряжения применялся генератор импульсных напряжений (ГИН) на 1440 кв. Для измерения амплитуды волны были применены емкостный делитель напряжения и

Данные химического анализа трех образцов ледовых вод реки Томи

Часть льдины (сечение параллельно свободной поверхности)	В мг на 1 л													
	Концентрация ионов водорода рН	Цвет	Наличие осадка	Вкус	Запах	Карбонатная жесткость в мг-экв/л	Плотный остаток при 110° С	Прокаленный остаток	Окисл кремния	Сумма полугорных (кислов)	Ионов кальция	Ионов магния	Ионов щелочных металлов (в пересчете на натрий)	Ионов аммония
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Верхняя (0—14 см) . . . .	7,2	Без цвета	Почти отсутствует	Без вкуса	Без запаха	0,076	7,0	3,0	0,33	0,16	1,129	0,263	0,538	Нет
Средняя (15—28 см) . . . .	7,1	Без цвета		Без вкуса	Без запаха	0,066	6,5	2,8	0,30	0,13	0,958	0,228	0,426	Нет
Нижняя (29—42 см) . . . .	7,2	Без цвета		Без вкуса	Без запаха	0,060	6,2	2,8	0,26	0,13	0,855	0,215	0,506	Нет

Продолжение табл. 1

Часть льдины (сечение параллельно свободной поверхности)	В мг на 1 л										В мг-экв на 1 л					
	Ионов железа двухвалентного	Ионов железа трехвалентного	Хлорид-ионов	Сульфат-ионов	Карбонат-ионов	Бикарбонат-ионов	Сульфид-ионов	Нитрит-ионов	Нитрат-ионов	Углекислота свободная	Ионов кальция	Ионов магния	Сумма ионов натрия и калия	Хлорид-ионов	Сульфат-ионов	Бикарбонат-ионов
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Верхняя (0—14 см) . . . .	Нет	Нет	0,232	0,905	Нет	4,636	Нет	Нет	Нет	1,386	0,0563	0,0216	0,0234	0,0065	0,0188	0,0760
Средняя (15—28 см) . . . .	Нет	Нет	0,245	0,663	Нет	4,026	Нет	Нет	Нет	1,155	0,0479	0,0187	0,0201	0,0069	0,0138	0,0660
Нижняя (29—42 см) . . . .	Нет	Нет	0,273	0,656	Нет	3,660	Нет	Нет	Нет	0,926	0,0427	0,0176	0,0220	0,0077	0,0136	0,0600

высоковольтный электронный осциллограф с большой скоростью записи. Осциллограф имел электронно-лучевую трубку 13ЛО2С и был изготовлен на кафедре техники высоких напряжений Томского политехнического института. В целях экранирования электронный осциллограф помещался в кабину из листового железа толщиной 0,8 мм. Размеры кабины  $1 \times 1,3 \times 1,8$  м<sup>3</sup> (рис. 1).

Синхронизация ГИН и осциллографа была выполнена непосредственно от искрового реле осциллографа при помощи тригatrona (рис. 2). Последовательное зажигание ГИН с промежутка  $G_1$  до промежутка  $G_7$  обеспечивалось равномерным увеличением расстояний между шарами с 40 мм во втором промежутке до 70 мм — на последнем. Выбранная схема синхронизации вполне обеспечивала устойчивую работу установки.

Для формирования фронта импульса были применены пять последовательно включенных конденсаторов типа ИМ-110 емкостью по 0,025 мкф каждый ( $C_\phi$ ) и сопротивление  $R_\phi$ , выбираемое по условиям эксперимента. Изменения  $R_\phi$  и  $C_\phi$  позволяли регулировать длину фронта волны от 1 до 30 мксек при амплитуде до 500 кв.

Образцы льда для испытаний имели полную толщину 40–60 мм и вырезались при помощи накаливаемой нихромовой проволоки в направлении, перпендикулярном свободной поверхности льда. На рис. 3 представлено сечение образца в плоскости электродов, толщина образцов в месте пробоя составляла 0,5; 1 и 1,5 см.

Размеры образца в плоскости, перпендикулярной направлению пробоя, выбирались такими, чтобы исключить перекрытие по поверхно-

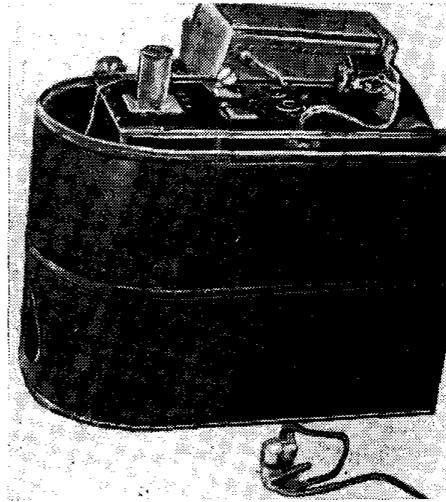


Рис. 1. Металлическая кабина для экранирования высоковольтного осциллографа.

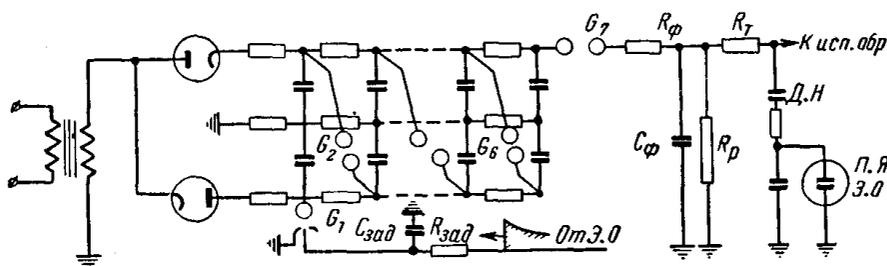


Рис. 2. Схема установки.

сти. Сферическая лунка для испытаний в однородном электрическом поле выплавлялась нагретым электродом—сферой, коническая лунка для испытаний в неоднородном поле засверливалась. Отбраковка образцов перед испытаниями производилась визуально, причем негодными признавались те, у которых в области электродов просматривались матовые плоскости, трещины или волосные полости. На рис. 4 представлена фотография образца толщиной 60 мм. Часы находились за образцом.

В целях предупреждения перекрытия по поверхности пробой производился в трансформаторном масле при температуре от  $-15^\circ$  до  $-5^\circ$  С.

В экспериментах со льдом применялись железные шлифованные электроды, а в экспериментах с дистиллированной водой—никелированные. Сферический электрод имел диаметр 94 мм, заземленный круг—плоскость 80 мм.

Электрод—острие имел диаметр цилиндрической части 12 мм и угол заточки острия около  $13^\circ$ .

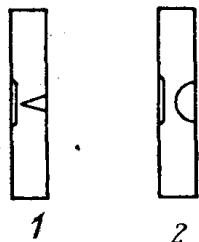


Рис. 3. Сечение образцов для испытания в неоднородном (1) и однородном (2) полях.

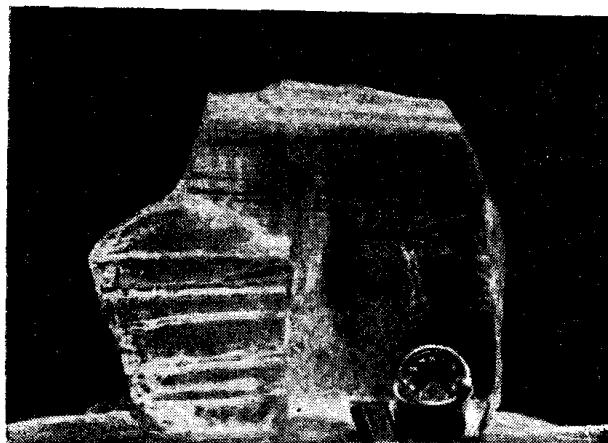


Рис. 4. Пластина льда для изготовления образца. Спичечная коробка перед образцом, часы—за образцом.

Образцы подвергались воздействию импульсов с амплитудой до 500 кв. Пробой происходил на фронте одиночного импульса.

Фотографирование импульсов напряжения с экрана электронно-лучевой трубки производилось фотоаппаратом «Киев» с объективом «Юпитер» светосилой 1:2 со специальной насадкой, увеличивающей фокусное расстояние для получения четкого изображения импульса на фотопленке. Обработка осциллограмм производилась после их увеличения в 1,5 раза по сравнению с размерами на экране осциллографа. Применялась панхроматическая фотопленка чувствительностью 180 единиц ГОСТ с эмульсией № 526, обрабатываемая обычными фотореактивами.

### Обсуждение полученных результатов

На рис. 5—8 представлена зависимость пробивного напряжения от экспозиции для различных толщин речного льда, на фиг. 9— зависимость пробивного напряжения от толщины и на рис. 10—зависимость электрической прочности  $E_{пр}$  от толщины. На этих же фигурах для сравнения приведены аналогичные зависимости, полученные автором,

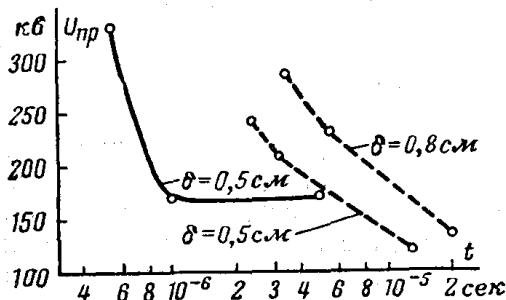


Рис. 5. Вольт-секундные характеристики речного льда и дистиллированной воды. Равномерное поле, импульс положительной полярности,  $\phi = 90\%$ . — речной лед; - - - - - дистиллированная вода.

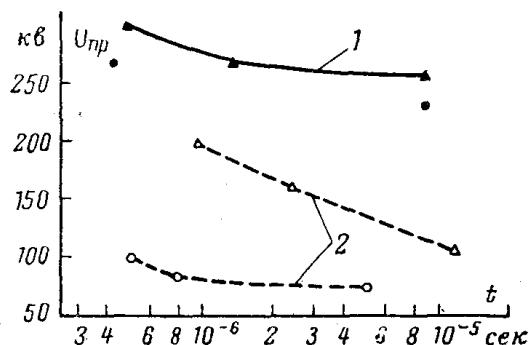


Рис. 6. Вольт-секундные характеристики речного льда и дистиллированной воды. Неравномерное поле. ●, ○—положительный импульс, ▲, △—отрицательный импульс,  $\delta = 0,5$  см,  $\phi = 90\%$ . 1—речной лед; 2—дистиллированная вода.

для дистиллированной воды. На каждую точку пробивалось от 7 до 15 образцов. Все кривые построены по данным статистической обработки результатов экспериментов при вероятности пробоя  $\psi = 90\%$ . Разброс данных составлял до  $\pm 30-40\%$  среднего значения.

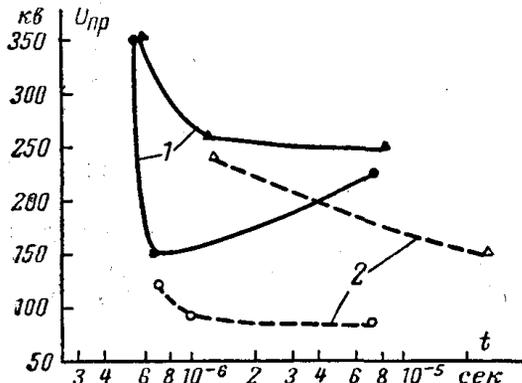


Рис. 7. Вольт-секундные характеристики речного льда и дистиллированной воды. Неравномерное поле, ●, ○ — положительный импульс, ▲, △ — отрицательный импульс,  $\delta = 1$  см,  $\psi = 90\%$ .  
Обозначение кривых по рис. 6.

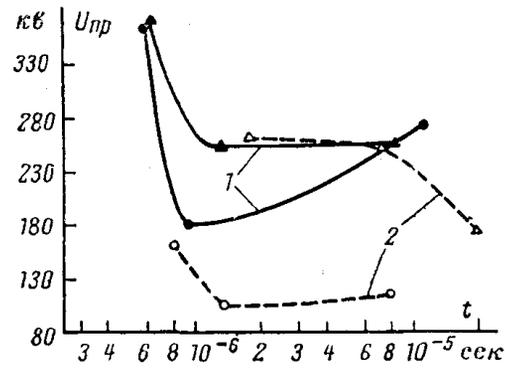


Рис. 8. Вольт-секундные характеристики речного льда и дистиллированной воды. Неравномерное поле; ●, ○ — положительный импульс, ▲, △ — отрицательный импульс,  $\delta = 1,5$  см,  $\psi = 90\%$ .  
Обозначение кривых по рис. 6.

Вольт-временные характеристики при пробое льда и дистиллированной воды в однородном и неоднородном электрических полях и при разных толщинах имеют вид, наблюдаемый для других диэлектриков

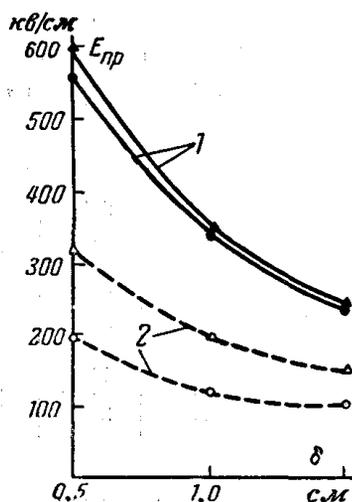


Рис. 9. Зависимость электрической прочности речного льда и дистиллированной воды от толщины при времени экспозиции  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$  сек. Неравномерное поле; ●, ○ — положительный импульс; ▲, △ — отрицательный импульс  $\psi = 90\%$ .  
Обозначение кривых по рис. 6.

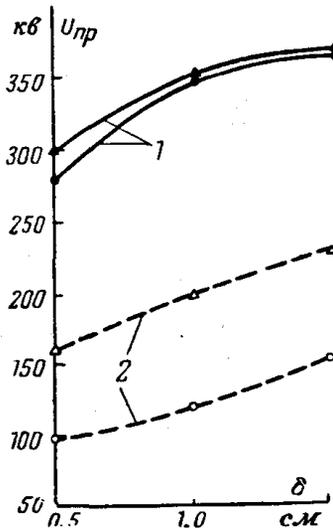


Рис. 10. Зависимость пробивного напряжения от толщины речного льда и дистиллированной воды при времени экспозиции  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$  сек. Неравномерное поле, ●, ○ — положительный импульс; ▲, △ — отрицательный импульс;  $\psi = 90\%$ .  
Обозначение кривых по рис. 6.

[4, 6]. Значительное возрастание электрической прочности  $E_{пр}$  начинается при экспозициях менее 1 мксек.  $E_{пр}$  с возрастанием толщины льда спадает быстрее, чем у дистиллированной воды.

Полученные нами вольт-временные характеристики льда позволяют произвести подсчет времени формирования и скорости развития разряда. Метод определения времени формирования разряда, предложенный Г. А. Воробьевым [11], поясняется на рис. 11, где  $U_t$  — пробивное на-

пряжение при малой экспозиции;  $U_0$  — пробивное напряжение, при котором не сказывается запаздывание разряда;  $t_0$  — время, соответствующее  $U_0$ ;  $t_\phi$  — время формирования разряда;  $t_{cn}$  — время спада напряжения при пробое диэлектрика.

Определение электрической прочности нерентгенизованной и рентгенизованной соли при экспозициях  $2 \cdot 10^{-8}$  сек [8, 9, 11] дало одинаковые значения  $E_{np}$  что дает право при расчетах времени формирования разряда в твердых диэлектриках пренебрегать статистическим временем запаздывания, которое там практически отсутствует благодаря постоянному наличию свободных электронов. Приняв последнее положение также и для льда, согласно [10] можно подсчитать скорость развития разряда по формуле

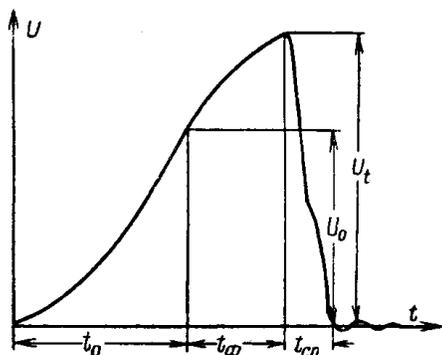


Рис. 11. График к определению времени формирования разряда.

$$v = \frac{\delta}{t_\phi},$$

где  $v$  — скорость развития разряда;  
 $\delta$  — толщина образца;  
 $t_\phi$  — время формирования разряда.

В табл. 2 даны результаты расчетов времени формирования и скорости развития разряда во льду.

Сравнивая скорости развития разряда во льду, данные в табл. 2, со скоростями развития разряда в ионных кристаллах и других диэлек-

Таблица 2

Форма поля	$\delta$ , см	$U_{np}$ , кв	$U_0$ , кв	$t_0$ , $10^{-7}$ сек	$t_\phi$ , $10^{-7}$ сек	$v$ , $10^8$ см/сек
1	2	3	4	5	6	7
Положительная сфера против заземленной плоскости	0,5	325	170	2,85	2,25	2,22
	1,0	330	225	3,52	1,63	6,14
	1,5	436	310	4,78	4,92	3,05
Положительное острие против заземленной плоскости	1,0	340	132	2,4	2,95	3,39
	1,5	375	180	3,05	3,21	4,67
Отрицательное острие против заземленной плоскости	0,5	305	230	3,6	1,05	4,77
	1,0	352	252	3,88	1,68	5,95
	1,5	368	260	4,0	2,0	7,5

Таблица 3

№ п/п.	Исследованные диэлектрики	Толщина $\delta$ , мм	Экспозиция $6 \cdot 10^{-8} \div 1,4 \cdot 10^{-7}$		Экспозиция $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек	
			$t_\phi$ , $10^{-8}$ сек	$v$ , $10^8$ см/сек	$t_\phi$ , $10^{-8}$ сек	$v$ , $10^8$ см/сек
1	2	3	4	5	6	7
1	NaCl	0,15	1,7	0,88	1,5	1,0
2	KCl	0,15	1,6	0,94	1,37	1,095
3	KBr	0,15	2,2	0,68	1,2	1,25
4	KJ	0,15	2,1	0,72	1,1	1,36
5	NaCl	0,3	3,0	1,0	Нет данных	
6	Орг. стекло	0,05	—	—	1,1	0,526
7	Сегнетова соль	0,15	2,35	0,64	—	—
8	NaCl острие $\ominus$	0,7	5,1	1,37	—	—
9	NaCl острие $\oplus$	0,7	0,9	7,77	—	—
10	Тальк пластин	0,15	1,95	0,78	—	—

триках [12], приведенными в табл. 3, можно заключить, что скорость развития разряда возрастает с ростом толщины твердого диэлектрика. Приведенные в табл. 2 и 3 данные о возрастании скорости разряда с увеличением толщины твердых диэлектриков аналогичны данным о возрастании скорости развития разряда в газовом промежутке с увеличением длины последнего [5]. Этот факт позволяет сделать предположение о возможности стримерного характера разряда в твердых диэлектриках при больших толщинах.

В опытах нами наблюдалась люминесценция льда при действии импульсов высокого напряжения. На рис. 12 представлена фотография люминесцирующего льда при импульсном напряжении положительной полярности с амплитудой 100 кВ, температура  $-15^{\circ}\text{C}$ . Расстояние между электродами заведомо больше пробивного и равно 70 мм, образец цилиндрической формы, сечением 120 мм, высотой 380 мм; железный электрод-острие заморожен в образец при его изготовлении. Образец находился в воздухе. Видимая люминесценция исчезает через несколько секунд после снятия напряжения. Интенсивность люминесценции увеличивается с понижением температуры льда.

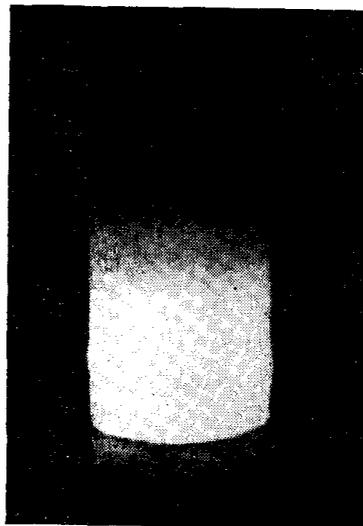


Рис. 12. Люминесценция льда в электрическом поле.

### Выводы

1. Вольт-временные характеристики твердых и жидких диэлектриков в толщинах от 5 до 15 мм аналогичны вольт-временным характеристикам твердых и жидких диэлектриков в малых толщинах. Возрастание электрической прочности льда наблюдается, так же как и для других твердых диэлектриков, в области малых экспозиций.

2. С увеличением толщины льда наблюдается понижение его электрической прочности.

3. С увеличением толщины льда скорость развития разряда в нем возрастает.

4. Как и для ионных кристаллов [4, 8], для льда обнаружено значительное повышение электрической прочности при отрицательной полярности импульса.

В заключение автор выражает сердечную благодарность профессору, доктору А. А. Воробьеву за предложение темы работы, научное руководство и постоянный интерес к работе, кандидату технических наук Г. А. Воробьеву за обсуждение работы и ряд ценных указаний, а также старшему преподавателю кафедры аналитической химии В. Б. Соколову за выполнение химического анализа льда.

### Литература

1. Draeger, Arch. f. Elektr., 13, 366, 1924.
2. Handrek, Hesch-Mitt., 46, 1929.
3. Lehmann F., Arc. J. Elektr., 32, 281, 1038.
4. Воробьев А. А. и Приходько Н. А., Труды Сиб. ФТИ, 4, 112, 1936.
5. Под ред. проф. Сиротинского Л. И., Техника высоких напряжений, ч. I, ГЭИ, 1951.
6. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д., ЖФТ, 3, 840, 1933.
7. Бокый Г. Б., Введение в кристаллохимию, МГУ, 1954.
8. Вальтер А. Ф., Инге Л. Д., ДАН СССР, 2, 65, 1934.
9. Воробьев Г. А., ЖЭТФ, 30, 256, 1956.
10. Уайтхед С., Пробой твердых диэлектриков, ГЭИ, 1957.
11. Воробьев Г. А., Изв. ТПИ., 91, 79, 1956.
12. Астафуров А. В., Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Кевролева К. М., Изв. ТПИ (в настоящем выпуске).