

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резниченко С.С. Математическое моделирование в горной промышленности. - М.: Недра, 1981.- 216 с.
2. Методы и средства решения задач горной геомеханики // Г.Н.Кузнецов, К.А.Ардашев, Н.А.Филатов и др.- М.: Недра, 1987.- 248 с.
3. Филимонов П.Е. Моделирование взаимодействия механизированных крепей с вмещающими породами методом конечных элементов // Физико-технические проблемы горного производства. - Донецк, ООО «Лебедь», 2001.- С. 149 - 157.
4. Гавриленко Ю.Н. Математическое моделирование сдвижения горных пород и земной поверхности в слоистом массиве методом конечных элементов // Известия Донецкого горного института. - 1997. - №1. - С. 87 - 93.
5. Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г. Численное моделирование процессов сдвижения массива горных пород и земной поверхности методом конечных элементов в объемной постановке // Физико-технические проблемы горного производства. - Донецк, ООО «Лебедь», 2001. - С. 12 - 25.
6. Антипов И.В. Квазидискретная модель нижнего слоя пород кровли // Физические процессы горного производства. - М., 1991. - С. 46 - 47.
7. Antypov I., Filimonov P., Shcherbinin D. Finite Elements Method in geomechanics // Вести Донецкого горного института: Всеукраинский научно-технический журнал горного профиля / Гл. ред. Александров С.Н. - Донецк: ДонНТУ, 2001. - С. 86 - 88.
8. Антипов И.В., Филимонов П.Е., Грядущий В.Б., Гатауллин Н.Н. Шахтные исследования и моделирование геомеханических процессов / Сб. научн. тр. "Геотехническая механика". - ИГТМ НАН Украины, № 30-2003.- С. 160-165.
9. Антипов И.В. Новое направление в разработке нетрадиционных крепей очистных забоев для тонких пластов // Уголь Украины. - 1996. - №10. - С. 19 - 21.
10. Антипов И.В., Кравченко В.Е. Шахтные испытания механизированной крепи нового уровня // Известия Донецкого горного института, 1999. - №3. - С. 47 - 51.
11. Антипов И.В., Щербинин Д.В., Поляков М.В. Новая малометаллоемкая механизированная крепь для очистных забоев // Уголь Украины. - 2001. - №4. - С. 26 - 28.

## УДК 532:539.3

Канд. физ.-мат. наук Г.А. Барбашова, канд. техн. наук В.Г. Жекул,  
канд. техн. наук В.М. Косенков, инж. А.П. Смирнов (ИИПТ),  
д-р техн. наук К.К. Софийский (ИГТМ НАН Украины)  
**ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧКИ КАМЕРЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО  
УСТРОЙСТВА НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ В  
СКВАЖИНЕ**

За допомогою математичної моделі електрорідіопульсних процесів у свердловині і у камері електророзрядного пристрію, використовуваного для впливу на призабійну зону свердловини, у даній роботі розглянуто вплив оболонки, пружних характеристик її матеріалу і діаметра свердловини на гідродинамічне навантаження на стінку свердловини.

### **INFLUENCE OF AN ENVIRONMENT OF THE ELECTRODIGINIT DEVICE CHAMBER ON HYDRODYNAMICAL LOADING IN A CHINK**

Through mathematical model of electrichydopulse processes in a chink and in the chamber of the electrodigit device, used for influence on a chink, the influence of an environment, elastic characteristics of her material and diameter of a chink on hydrodynamical loading on a wall of a chink is considered.

Для декольматации скважин в процессе их эксплуатации нашли применение различные импульсные методы обработки. К ним можно отнести метод взрываия зарядов ВВ, пневмовзрывной метод, метод электрического заряда в

жидкости и ряд других [1]. Эффективность этих методов характеризуется амплитудой волны давления на стенку скважины, величиной удельного импульса и плотностью акустической энергии.

Одним из самых перспективных и эффективных импульсных методов является электроразрядный метод декольматации скважин. На его эффективность оказывает влияние гидростатическое давление и температура в скважине, а также изменяющаяся в широком диапазоне электропроводность внутристеклянной жидкости. Для получения наибольшего положительного эффекта, электропроводность должна быть оптимальной, что в реальных условиях бывает очень редко. Поэтому возникла необходимость в закрытых электродных системах. Их особенностью является наличие упругой, акустически прозрачной оболочки, которая отделяет внутреннее пространство (электроды, погруженные в жидкость с оптимальной для разряда электропроводностью) от скважинной жидкости [2]. В таких устройствах волна давления, образующаяся при электрическом разряде, передается во внешнюю среду через упругую оболочку, существенно преобразуясь при этом. В результате этого изменяется режим нагружения стенки скважины и процесс воздействия на призабойную зону. Оценка влияния оболочки и упругих свойств ее материала на гидродинамическую нагрузку на стенку скважины позволит сделать выводы по эффективному использованию устройств с закрытыми электродными системами.

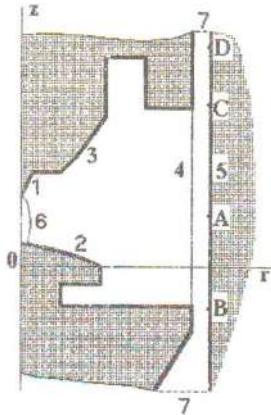
Теоретическому исследованию влияния оболочки и ее упругих характеристик, а также диаметра скважины на гидродинамическую нагрузку давления на призабойную зону скважин посвящена данная работа.

В данном разделе будет дана математическая постановка задачи исследования гидродинамических процессов в камере электроразрядного устройства (ЭРУ), используемого для очистки призабойной зоны скважин, и в области скважины, прилегающей к устройству. Схема разрядной камеры ЭРУ приведена на рис. 1.

При построении математической модели указанных процессов принятые следующие допущения:

- стенки электроразрядного устройства и скважины абсолютно жесткие; канал разряда в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равна длине межэлектродного промежутка, а ось симметрии совпадает с осью симметрии скважины и ЭРУ;
- стенка канала непроницаема;
- скважина заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, а канал разряда - идеальной плазмой;
- оболочка однородная, тонкая и упругая.

Гидродинамические характеристики электрического разряда исследуются в области жидкости, ограниченной подвижной непроницаемой стенкой образовавшегося при электроразряде канала (внутренняя граница расчетной



1,2 – электроды; 3 – полизтиленовый электрический изолятор; 4 – «окно» устройства; 5 – стена скважины; 6 – канал разряда; 7 – границы зазора между ЭРУ и стенкой скважины

Рис. 1 Схема электродной системы электроразрядного устройства

области) и жесткой неподвижной поверхностью, которую составляют внутренняя поверхность ЭРУ и участок стенки скважины, находящийся между точками *B* и *D* (внешняя граница). Частью внешней границы является также свободные поверхности (линии 7). В том случае, когда «окно» разрядной камеры закрыто оболочкой, гидродинамические процессы изучаются в области жидкости между стенкой канала разряда и оболочкой, а также в области между оболочкой и стенкой скважины.

В соответствии с принятыми допущениями математическая постановка задачи запишется следующим образом.

В области жидкости ограниченной контактным разрывом плазма-вода и неподвижной жесткой стенкой необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики [3]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4,$$

где  $F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T$ ;  $F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + p, (e + p)v_z]^T$ ;  $F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (e + p)v_r]^T$ ;  $F_4 = [0, p, 0, 0]^T$ ; *t* – время; *r* и *z* – цилиндрические координаты;  $v_r$  и  $v_z$  – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости; *p* – давление;  $\rho$  – плотность.

$$e = \rho[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2],$$

где  $\varepsilon$  - удельная внутренняя энергия [3] ( $\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)] / [\rho(\kappa - 1)]$ ), где  $\rho_0$  - плотность покоящейся жидкости;  $c_0$  - скорость звука в покоящейся жидкости;  $k = 7,15$ ).

Границные условия ставятся на внутренней и внешней границах расчётной области, а также на границе оболочки-жидкость.

На внутренней границе расчетной области параметры определяются при решении системы уравнений, которую составляют [4]:

- уравнение баланса напряжений в разрядном контуре

$$L \frac{dI}{dt} + I(R_K + R_{\text{ш}}) + q/C = U_0, \quad (1)$$

где

$$I = dq/dt; \quad (2)$$

- уравнение сопротивления канала

$$R_K = l_K / (\sigma_n \pi r_K^2); \quad (3)$$

- уравнение баланса энергии в канале

$$\frac{d(p_K V_K)}{dt} \frac{I}{\gamma - 1} + p_K \frac{dV_K}{dt} = I^2 R_K; \quad (4)$$

- уравнение состояния плазмы

$$\sigma_n = p_K / A_u (\gamma - 1). \quad (5)$$

В соотношениях (1) - (5)  $I$  - ток разряда;  $L$  - индуктивность электрической цепи;  $C$  - емкость конденсаторной батареи;  $U_0$  - начальное напряжение;  $R_k, R_{\text{ш}}$  - сопротивление канала и шин разрядного контура;  $q$  - электрический заряд;  $\sigma_n$  - удельная электропроводность плазмы;  $l_k$  - расстояние между электродами;  $r_k$  - радиус канала разряда;  $p_k, V_k$  - давление в канале и его объем;  $\gamma = 1,26$ ;  $A_u$  - искровая постоянная.

Текущие значения напряжения в канале разряда и мощности разряда определяются по формулам:

$$Y = IP_K,$$

$$N = I^2 P_K,$$

Условие непротекания на внешней границе расчетной области - неподвижной жесткой стенке [3]:  $\omega_v = 0$ , где  $v_n$  - нормальная составляющая вектора скорости жидкости.

На границе оболочки-жидкость ставится условие

$$\omega_v = \omega \quad (6)$$

где  $w$  - нормальная составляющая скорости оболочки.

На границах зазора между ЭРУ и стенкой скважины (линии 7 на рис. 1) давление жидкости равно гидростатическому. Эта граница находится на таком расстоянии, чтобы волны давления от канала разряда не достигали их в рассматриваемый период времени.

Для описания динамики оболочки используются уравнения, основанные на гипотезах Кирхгофа-Лява. Эти уравнения для цилиндрической оболочки при осесимметричном нагружении записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_i u_{ii} &= u_{xx} + v/R w_x \\ \gamma_i w_{ii} &= -\beta w_{xxxx} - (w/R + u_x)/R + p^* \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\gamma_i = \frac{\rho_i(1-\nu^2)}{E}$ ;  $\beta = \frac{h^2}{12}$ ;  $p^* = \frac{P(1-\nu^2)}{Eh}$ ;  $x$  - осевая координата на поверхности оболочки;  $u$  и  $w$  - перемещения оболочки вдоль  $x$  и нормали к серединной поверхности оболочки;  $R$  и  $h$  - радиус и толщина оболочки;  $\rho_i$  - плотность материала;  $E$  - модуль Юнга;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $P$  - давление жидкости, равное разности внутреннего и внешнего давления на оболочку.

Оболочка жестко заделана:  $v = \omega = 0$ ,  $w_x = 0$ .

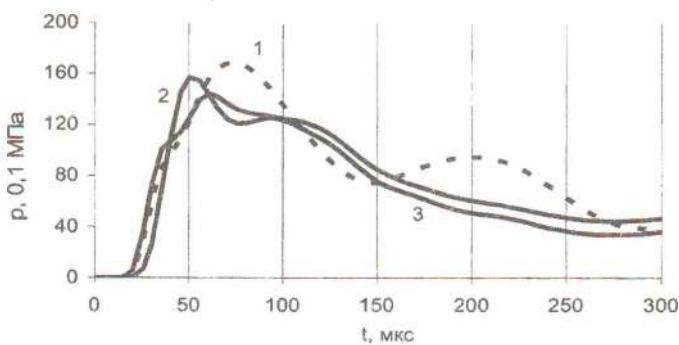
Учитываются взаимное влияние изменения формы оболочки и гидродинамической нагрузки, действующей на нее. Уравнения (7) приводятся к конечно-разностному виду и решаются методом прогонки [5]. Определяются компоненты вектора скорости оболочки. Нормальная составляющая входит в условие (6). Гидродинамическая часть задачи решается конечно-разностным методом С.К. Годунова [3]. Расчетная сетка учитывает перемещение стенки канала разряда и оболочки, а также форму внутренней поверхности разрядной камеры ЭРУ. Система уравнений (1) - (5) решается методом Рунге-Кутта.

Решение внутренней задачи для цилиндрической оболочки подробно описано в работе [6]. Принцип работы устройства, схема которого дана на рис. 1, описан в работе [7]. Там же приведены основные результаты расчета гидродинамических характеристик в камере с открытой электродной системой и прилегающей к ней области скважины.

Приводимые в данной работе результаты исследования получены при следующих значениях параметров электрической цепи:  $U_0 = 28,5$  кВ,  $L = 4$  мкГн,  $C = 3,3$  мкФ. Длина межэлектродного промежутка  $l_k = 0,047$  м.

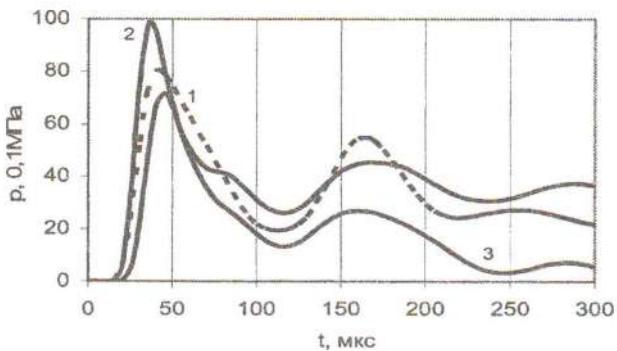
Характеристики материала оболочки:  $E = 1,2 \cdot 10^9$  Па,  $\nu = 0,48$ ,  $\rho_l = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. Толщина оболочки  $h = 0,005$  м, радиус  $R = 0,053$  м. Радиус скважины  $r_c = 0,14$  м и  $r_c = 0,068$  м.

Анализируя полученные при решении задачи данные, приведенные в частности, на рис. 2 - 4, нужно отметить следующее.



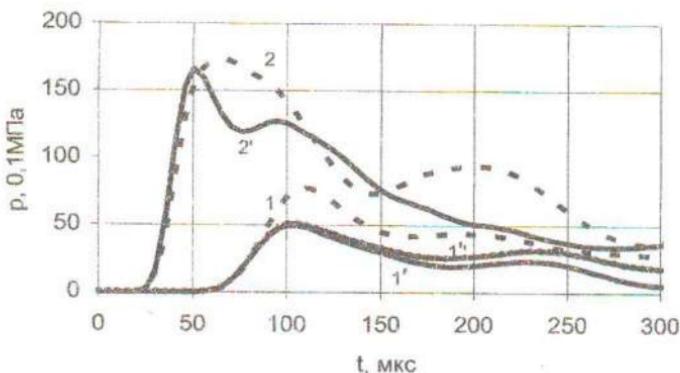
1 – на расстоянии 0,05 м от оси симметрии в ЭРУ без оболочки; 2 – в прилегающей изнутри к оболочке жидкости; 3 – в прилегающей снаружи к оболочке жидкости

Рис. 2 - Давление в плоскости серединного сечения канала разряда в скважине радиуса 0,068 м



1 – на расстоянии 0,05 м от оси симметрии в ЭРУ без оболочки; 2 – в прилегающей изнутри к оболочке жидкости; 3 – в прилегающей снаружи к оболочке жидкости

Рис. 3 - Давление в плоскости серединного сечения канала разряда в скважине радиусом 0,14 м



1 – в ЭРУ без оболочки,  $r_c = 0,14$  м; 1' – в ЭРУ с оболочкой,  $r_c = 0,14$  м;  
 1" – в ЭРУ при  $E = 1,2 \cdot 10^7$  Па,  $r_c = 0,14$  м; 2 – в ЭРУ без оболочки,  $r_c = 0,068$  м;  
 2' – в ЭРУ с оболочкой,  $r_c = 0,068$  м.

Рис.4 Давление на стенку скважины в плоскости срединного сечения канала разряда: 1 – в ЭРУ без оболочки,  $r_c = 0,14$  м; 1' – в ЭРУ с оболочкой,  $r_c = 0,14$  м; 1" – в ЭРУ при  $E = 1,2 \cdot 10^7$  Па,  $r_c = 0,14$  м; 2 – в ЭРУ без оболочки,  $r_c = 0,068$  м; 2' – в ЭРУ с оболочкой,  $r_c = 0,068$  м.

В разрядной камере ЭРУ с открытой электродной системой в области скважины, прилегающей к «окну» устройства, давление жидкости после достижения максимума убывает по экспоненциальному закону с некоторыми колебаниями, связанными с приходом отраженных от поверхности ЭРУ волн (кривые 1 на рис. 2 – 4 и 2 на рис. 4).

Наличие оболочки, закрывающей окно устройства, усложняет картину течения. Большое значение имеет также величина зазора между устройством и стенкой скважины.

При  $r_c = 0,068$  м максимальные значения давления достигаются во время прихода отраженной от стенки скважины волны (см. рис. 2, кривые 2 и 3). Поэтому они превышают максимальные значения давления на оболочку, полученные при  $r_c = 0,14$  м, в два раза спаружи и в полтора раза изнутри оболочки (см. рис. 3, кривые 2 и 3). Значение давления жидкости на оболочку изнутри и в скважине около «окна» ЭРУ при  $r_c = 0,068$  м после прихода к оболочке отраженной от стенки скважины волны отличаются незначительно: давление на оболочку изнутри превышает внешнее не более, чем на 20%. Поэтому смещение оболочки относительно первоначального положения невелико (примерно 0,3 мм при  $t = 300$  мкс в плоскости срединного сечения канала разряда). Давление жидкости в рассматриваемой области убывает по кривой, которую можно аппроксимировать экспонентой. Волна давления распространяется вверх и вниз от «окна» устройства вдоль стенки скважины с уменьшением амплитуды по гиперболическому закону. Максимальное значение

давления на стенку скважины в случае закрытой электродной камеры ЭРУ незначительно меньше, чем в случае открытой, а импульс давления за рассматриваемый период времени меньше примерно на 15% (см. рис. 4, кривые 2 и 2').

При  $r_c = 0,14$  м отраженная от стенки скважины волна слабо влияет на оболочку, поскольку приходит она значительно позже и амплитуда ее значительно меньше, чем при  $r_c = 0,068$  м. В этом случае поведение оболочки определяют, в основном, волны давления, распространяющиеся от канала разряда и отраженные от стенок камеры ЭРУ, а также упругие свойства материала оболочки. Скорость оболочки после прихода волны давления от канала разряда достигает максимального значения – и в течение некоторого периода времени изменяется мало, а после четырехкратного падения давления на оболочку резко убывает. Максимальное перемещение оболочки в плоскости срединного сечения канала составило 1,3 мм в момент  $t = 300$  мкс. После этого момента времени сказываются упругие свойства материала оболочки: несмотря на значительное превышение внутреннего давления на оболочку над внешним, ее скорость становится отрицательной.

Максимальное значение давление на оболочку изнутри примерно на 25% больше внешнего (см. рис. 3, кривые 2 и 3). Амплитуда волн давления на стенку скважин в том случае, когда «окно» ЭРУ закрыто оболочкой, на 1/3 меньше, чем при открытой электродной системе, а импульс давления – почти в два раза (см. рис. 4, кривые 1 и 1'). После достижения максимума давление в скважине падает, приближаясь к атмосферному. Давление в камере ЭРУ, в частности на оболочку, стремится к установлению, а его значение приближается к значению давления в камере ЭРУ при  $r_c = 0,068$  м.

Выполнены также расчеты при  $E = 1,2 \cdot 10^7$  Па ( $r_c = 0,14$  м) и при прежних значениях других характеристик электрического разряда и оболочки. В этом случае амплитуда давления на стенку скважины почти не отличается от амплитуды при  $E = 1,2 \cdot 10^9$  Па, а импульс давления за рассматриваемый период времени примерно на 30% больше. Давление жидкости в скважине практически равно давлению в камере ЭРУ – и с течением времени приближается к значению давления в ЭРУ с открытой электродной системой.

Исходя из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Наличие резиновой оболочки, закрывающей камеру ЭРУ, несущественно влияет на гидродинамическую нагрузку в призабойной зоне скважины, если зазор между устройством и стенкой скважины мал (желательная величина зазора не более 0,01 м).

2. При увеличении зазора между ЭРУ и стенкой скважины изменяется нагрузка на призабойную зону. Например, при  $r_c = 0,14$  м импульс давления на стенку скважины вдвое меньше импульса давления, полученного при использовании ЭРУ без оболочки (модуль Юнга  $E = 1,2 \cdot 10^9$  Па). В этом случае негативное влияние оболочки можно уменьшить, если использовать для оболочки материал с  $E < 10^7$  Па.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкатов Д.Н., Драхлис С.Л., Сафонов В.В., Квашнин Г.П. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду. – М.: Недра, 1988. – 268 с.
2. Пат. 27436 Україна, МІК<sup>6</sup> Е 21 В 43/112. Електротрійомпульсний свердловинний пристрій. / В.А. Саенко, С.Г. Поклонов (Україна). – Заявлено 09.03.94 // Промислова власність. – 2000. – №4.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под. ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
4. Иванов В.В., Швец И.С., Иванов А.В. Подводные искровые разряды. – Киев: Наук. думка, 1982. – 190 с.
5. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 588 с.
6. Г.А. Барбашова, А.В. Иванов Поведение тонкой цилиндрической оболочки под действием импульсной нагрузки // Електрический разряд в конденсированных средах. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 55 - 60.
7. Г.А. Барбашова, В.М. Косенков Определение гидродинамической нагрузки на стенку нефтяной скважины, формируемой электрическим разрядом // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – т. 42, №6. – С. 93 - 97.

УДК 532.595

Канд. техн. наук О.Н. Сизоненко,  
д-р техн. наук Л.М. Дыхта (ИИПТ)

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН СЖАТИЯ В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ

На основі методу асимптотичних еквівалентних функцій розроблено ефективний алгоритм розрахунку переходної функції нестационарної задачі про поширення хвиль стиску в газожидкостному середовищі. Установлено математичну природу осциляцій зазначеної функції і запропонована проста формула для оперативного обчислення її значень із прийнятної для практичних обчислень точністю.

## DEVELOPMENT OF A WAY OF ACCOUNT OF TRANSITIVE FUNCTION AT DISTRIBUTION OF COMPRESSION WAVES IN GASLIQUID ENVIRONMENT

On the basis of a method of asymptotic equivalent functions the effective algorithm of account of transitive function of a non-stationary task of development of waves of compression in gasliquid environment is developed. The mathematical nature oscillation of the specified function is established and the simple formula for operative account of her meanings with accuracy, accepted to practical calculations, is offered

Краевая задача о распространении возмущений в газожидкостной среде. Как известно [1 - 3], газожидкостная среда – несжимаемая жидкость с пузырьками газа – обладает рядом специфических свойств, оказывающих иногда существенное влияние на процесс распространения волн сжатия. Одна из математических моделей газожидкостной среды – модель эквивалентной сплошной среды предложена в работах [1, 3]. Эта модель, с одной стороны, вполне удовлетворительно описывает процесс распространения возмущений при значениях параметров, характерных для разрядно-импульсных технологий, а с другой – при своей реализации в процессе решения прикладных задач с помощью ЭВМ требует несколько меньших затрат машинного времени по сравнению с другими моделями.