

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2022)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/AFHU6838>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *д.т.н., профессор*
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD*
Омарова А.Р., *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/TFYU1550>***Е. Ж. Сарсикеев¹, А. К. Оразбекова², Г. О. Сулейменова³**^{1,2,3} Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

БЕТОН МЕН ТЕМІРБЕТОНДА ТҰТАНУ МОДЕЛІН ЖАСАУ ЖӘНЕ ЭЛЕКТР РАЗРЯДТАРЫН ДАМУ

Бұл мақалада генераторлық конденсаторы, кедергісі, индуктивтілігі және жүктемесі (плазмалық канал) бар эквивалентті тізбек негізінде жоғары вольтты импульстік генератордың разрядты тізбегінің моделін құру бойынша жұмыстың нәтижелері келтірілген. Модель разрядты тізбек үшін Кирхгоф теңдеулеріне және разряд каналының кедергісінің өзгеруін есептеу үшін Ромпе-Вайцель теңдеуіне негізделген. Генератордың жұмысы сыйымдылықпен, тізбектің активті кедергісімен, индуктивтілікпен, генератордың сыйымдылығы зарядтала алатын бастапқы кернеумен анықталады. Сыйымдылық пен кернеудің мәндері сыйымдылықты жинақтағыш сақтаған энергияны анықтайды. Каналдық сатыда сыйымдылық пен индуктивтілік генератор тізбегіндегі тербелістердің тербелмелі сипатын анықтайды. Разрядты арналарды қайталап модельдеу тұрақсыздықты дамытудың стохастикалық-детерминистік тәсіліне негізделген: зарядтардың қозғалысы дамушы каналдар бойындағы электродтар мен материалдардағы зарядтардан құралған өрістің бөлінуі токтың үздіксіздігі, Ом, Пуассон теңдеулерімен сипатталады, ал әр нүктедегі диэлектриктің өткізгіш күйге (плазмаға) оту ықтималдығы жинақталған энергияның тығыздығымен, яғни өріс кернеуінің квадратымен анықталады. Осылайша электр өрісінің таралуына байланысты процесстер сызықты емес интегро-дифференциалдық теңдеулер негізінде детерминистік тұрғыда қарастырылады. Разрядтың даму сипаты, каналдың кедергісінің өзгеруі және оның кеңейуі энергияның бөлінуімен анықталатындықтан, бұл теңдеулер нақты импульсті генератор тізбегіндегі отпелі теңдеулермен келісілген түрде шешіледі.

Кілтті сөздер: бетон, сыну, электр разряды, канал, жарылыс, кернеу генераторы, импульс, кернеу, электродтар.

Кіріспе

Бетон мен темірбетонды электрлік разрядты жою капиллярлық разряд кезінде, қатты диэлектриктің қалыңдығында импульстік разрядтық арна дамыған кезде электрлік импульстік әсердің көмегімен жүзеге асырылады. Монографияда электроимпульстік технологияның физикалық негіздері және оны технологиялық қолданудың кейбір аспектілері сипатталған [1].

Зерттеу тақырыбы бойынша көптеген жарияланымдар мен патенттерге қарамастан, разрядтық арнаға энергия енгізудің энергетикалық, қуат және режимдік параметрлерін бағалау және таңдау тек анық жеткіліксіз эксперименттік деректер негізінде, көбінесе сенімді шешім үшін және жиі негізсіз маржамен технологиялық мәселелерді сенімді шешу үшін жасалады. Сондықтан әлемде жасалған жабдықтардың тәжірибелік өнеркәсіптік үлгілері механикалық жою әдістерімен салыстырғанда айтарлықтай салмақтық және өлшемдік сипаттамаларға, жоғары құнына және төмен энергия тиімділігіне ие.

Темірбетон бұйымдарын жою суда жүзеге асырылады, сондықтан бетонның қалыңдығындағы ұшқын арнасын тиімді бастау үшін, алдыңғы ұзақтығы шамамен 10^{-7} с жоғары вольтты импульстар (импульстік еңіс 1000-2000 кВ/мкс) қажет. Сондықтан жоғары кернеу көзі импульстің амплитудасын кең ауқымда реттеуге мүмкіндік беріп, импульс фронтының ұзақтығын және тізбектегі энергияның шығу уақытын өзгерту мүмкіндігін қамтамасыз етуі керек. Бұл талапты Маркс схемасы бойынша жұмыс істейтін генераторлар орындайды.

Материалдар мен әдістер

Берілген тарауда *жоғары вольтты импульстік генератордың жұмысы мен разрядының өздігінен үйлесімді моделін* қарастырамыз.

Диэлектриктегі (бетондағы) разрядтық құрылымның дамуы және импульстік кернеу генераторының жұмысы C сыйымдылығы, R кедергісі және L индуктивтілігі бар тербелмелі контурдың эквивалентті тізбегі негізінде модельденеді (1–сурет, а). Бұл схеманы таңдау мұндай генераторлардың эксперименттерде және электр разрядының технологияларында қолданылуына байланысты. Жүктеме паразиттік сыйымдылық C_s параллель қосылған разряд саңылауы болып табылады. Алдын ала зарядталған сыйымдылық C энергияны жинақтау болып табылады, ал контур индуктивтілігі L шиналық индуктивтіліктен, генератор конденсаторларынан және разряд саңылауынан тұрады. Айнымалы тізбектің кедергісі R генератордың сымдар мен ұшқын саңылауларының Sw кедергісін ескереді.

Тізбекті ауыстырғаннан кейін (уақыт $t=0$) R кедергісі экспоненциалды түрде төмендейді деп есептеледі.

$$R = R_1 + (R_0 - R_1)e^{-t/\theta_R}$$

мұндағы R_0 мәні $t=0$ кезіндегі бастапқы кедергі, R_1 – шекті минималды кедергі мәні, оның мәні ауа саңылаулары бар кең таралған 6-10 қадамдық Аркадьев-Маркс импульстік кернеуді көбейту тізбектері үшін (1,5–3) Ом тең; θ_R – тізбекті ауыстырудың сипаттамалық уақыты.

C_s тізбегінің паразиттік сыйымдылығы құрылымдық элементтердің паразиттік сыйымдылықтарының қосындысы болып табылады. Кілт жабылған кезде тізбек элементтеріндегі кернеулердің қосындысы нөлге тең болады:

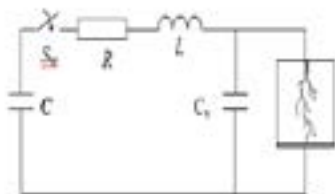
$$U_C + U_R + U_L + U_D = 0$$

U_C – C сыйымдылықтағы кернеу; $U_R = I \cdot R$ – R кедергісіндегі кернеу; $U_L = -L \frac{dI}{dt}$ – L индуктивтілігіндегі кернеу; U_D – разряд саңылауындағы кернеудің төмендеуі; $I = C \frac{dU_C}{dt}$ – генерациялаушы конденсатор C арқылы өтетін ток. Ток I паразиттік сыйымдылық $I_s = C_s \frac{dU_D}{dt}$ пен разряд саңылауының I_D арасы арқылы өтетін токтардың қосындысына тең:

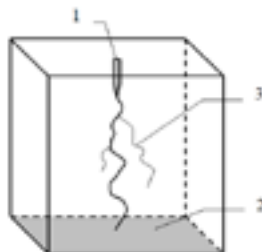
$$I = I_s + I_D.$$

Разряд саңылауындағы кернеудің төмендеуі $U_D(t)$ және ол арқылы өтетін ток $I_D(t)$ диэлектриктегі разрядтың дамуын модельдеумен өзара байланысты теңдеулер бойынша есептеледі.

а)



б)



C – генератор сыйымдылығы, K – ауыстырып-қосқыш, L – контур индуктивтілігі, R – тізбектің айнымалы кедергісі, C_s – паразиттік сыйымдылық; 1 – потенциалдық электрод, 2 – жерге тұйықталған электрод, 3 – разрядтық арналар.

1-сурет – Импульстік кернеулер мен жүктемелер генераторының эквивалентті тізбегі (а) және электродтар жүйесі «ұштық-жазықтық» (б)

Электродтардың ұшы-жазықтық (біртекті диэлектрик) геометриясында разрядтың дамуы қарастырылады (1 б-сурет).

Жоғары вольтты генератордың жұмысын модельдеу мен разрядты әзірлеу арасындағы үйлестіру шекаралық шарттарды қолдану арқылы

жүзеге асырылады. Потенциалды электродта S_p (модельдеу аймағының жоғарғы беті және ұшы) потенциал мәні разряд саңылауындағы $\varphi|_{S_p} = U_D$ қарқындылыққа тең, жерге тұйықталған электродта S_0 (төменгі бет) потенциал нөлге тең $\varphi|_{S_0} = 0$ деп қабылданады.

Сонымен қатар разряд саңылауы арқылы өтетін токтардың теңдік шарты орын алады

$$\int_{S_0} \left(-\varepsilon_0 \frac{d}{dt} (\nabla \varphi) - \sigma \nabla \varphi \right) dS + \sum \gamma E_i = I_0$$

Соңғы өрнектегі интеграл астындағы бірінші мүше потенциалдық электродтың беті арқылы өтетін орын ауыстыру тоғына, ал екінші мүшесі көлемді өткізгіштік токқа сәйкес келеді. Қарастырылған өрнектегі қосынды потенциалдық электродтан өсетін разрядтық арналар арқылы өтетін жалпы өткізгіштік токқа сәйкес келеді. Модельдеу аймағының бүйірлік шекараларында циклдік шекаралық шарттар орнатылады.

Ұсынылған модель негізінде жоғары вольтты генератордың жұмысымен бірге диэлектриктегі разрядтың дамуын компьютерлік модельдеуді жүзеге асыруға мүмкіндік беретін сандық алгоритм және бағдарламалық қамтамасыз ету әзірленді. Потенциалды және заряд тығыздығының үлестірімі айқын-көрінбеген схеманы пайдалана отырып, теңдеулердің ақырлы-айырымы жуықтауы негізінде есептеледі. Әрбір уақыт қадамында генератор тізбегіндегі және разрядты модельдеу аймағындағы кернеулер мен токтарды есептеу итерациялық процедураны қолдану арқылы орындалады.

t^n уақыт бойынша дискретизация Δ_t бекітілген қадаммен жүзеге асырылады, n индексі $t^n = n \cdot \Delta_t$ уақытындағы қадамдарды санайды. Разряд дамуының модельдеуін жасайтын аймағы h жағымен біркелкі тікбұрышты тормен жабылған. n қадамында (i, j, k) нөмірленген әрбір ұяшық потенциал

φ_{ijk}^n мен заряд тығыздығының ρ_{ijk}^n өзгеруімен сипатталады.

Разрядты құрылымы сызықтық тармақталу құрылымы болып табылады. Модельде ол көрші ұяшықтардың орталықтарын байланыстыратын түзу сызықты элементтердің жиынтығы ретінде ұсынылған. Ұяшықтарды (i, j, k) және (i', j', k') байланыстыратын құрылым элементі (i, j, k, i', j', k') индексімен беріледі. Разряд құрылымының элементінің бірлігіне өткізгіштігі функциясымен анықталады: $\gamma_{ijk, i'j'k'}$ (i, j, k) саны бар әрбір ұяшыққа салыстырмалы өткізгіштік ε_{ijk} , критикалық беріктік

E_{ijk} , меншікті өткізгіштік σ_{ijk} , өсу ықтималдық коэффициенті α_{ijk} ,

электрөткізгіштік бірлігінің бастапқы мәні $(\gamma_0)_{ijk}$ және бірлік өткізгіштіктің өсу χ_{ijk} және кему ζ_{ijk} коэффициенттері бар диэлектрлік ортаның элементіне сәйкес келеді.

Әрбір уақыт қадамында дәреже құрылымына ұяшықтардың ерікті санын қосуға болады. Бұрыннан разрядты арнасы бар іргелес орналасқан ұяшықтағы (i, j, k) разрядтық құрылым элементінің (i', j', k') ұяшықта қалыптасу ықтималдығы келесідей есептеледі:

$$P_{i,j,k|i',j',k'}^{n+1} = 1 - e^{-\Phi_{i,j,k}(E_{i,j,k} - \Phi_{i',j',k'}) / h} \cdot \exp(\Phi_{i',j',k'} - E_{i',j',k'})$$

мұндағы $E_{i,j,k} = (\Phi_{i,j,k}^* - \Phi_{i',j',k'}^*) / h$ – электр өрісінің кернеулігі, h – (i, j, k) және (i', j', k') ұяшықтар арасындағы қашықтық. Жаңа элементті разрядтық құрылымға қосу кезіңі $[0..1)$ интервалында біркелкі таралуы бар R кездейсоқ саны $P_{i,j,k|i',j',k'}^{n+1}$ -нен аз болғанда болады, ал басқаша жағдайда болмайды. Әртүрлі элементтердің қосылу ықтималдығы статистикалық түрде тәуелсіз.

Плазмалық ыдырау арнасының күйінің өзгеруі төменде қарастырылады.

Разряд құрылымының өсуі өткізгіштік арна арқылы электродаралық саңылаудың көпірленуімен аяқталады (бұзу). Электродтарды жабатын арнада токтың жылдам өсуі басталады, энергияның бөлінуінің жоғарылауы және соның салдарынан плазма өткізгіштігінің жоғарылауы, бұл өз кезегінде токтың одан әрі өсуіне әкеледі. Энергияның қарқынды бөлінуі плазманың температурасы мен қысымының жоғарылауына және соның салдарынан арнаның кеңеюіне әкеледі.

Плазмалық ыдырау арнасының кеңеюінің сипаттамасы энергия балансының теңдеуіне негізделген.

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dA}{dt} + N_j = N_i$$

мұндағы W – арнадағы плазманың ішкі энергиясы, A – арнаның кеңеюінің жұмысы, N_j – Джоуль энергиясының бөлінуінің күші, N_i – диэлектриктегі сәулелену және жылу алмасу үшін энергия жоғалтуларының күші. Арнаның кеңеюін егжей-тегжейлі сипаттау плазма күйінің өзгеруін, сондай-ақ температураның, тығыздықтың, қысымның және плазманың өткізгіштігінің таралуындағы біртекті еместерді ескеруді талап етеді.

Бұл модельде келесі жеңілдететін болжамдар қолданылады:

плазманың бұзылу арнасы белгіленген ұзындықтағы l және уақытқа тәуелді радиусы r_{ch} цилиндрлік элементтердің жиынтығымен сипатталады, $r_{ch} l$ деп есептеледі;

- әрбір элементтің кеңеюі басқа элементтерден тәуелсіз қарастырылады;

- әрбір элемент үшін температураның, қысымның және элемент көлемінде өткізгіштіктің біркелкі таралуы қабылданады.

Канал элементінің плазмасының ішкі энергиясы W адиабаталық жуықтауда өрнекпен сипатталады.

$$W = \frac{P \cdot V}{\gamma - 1}$$

мұндағы γ - тиімді адиабаталық көрсеткіш, P және V сәйкесінше плазманың қысымы мен көлемі.

l ұзындығы мен радиусы r_{ch} болатын плазмалық арна элементінің кеңею жұмысы төмендегі қатынаспен анықталады:

$$dA = P \cdot dV = P \cdot l \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{ch}$$

мұндағы $S = \pi r_{ch}^2$ - көлденең қиманың ауданы.

Жылу шығының қуаты плазманың ішкі энергиясына пропорционал деп есептеледі:

$$N_i = \psi \frac{P \cdot l \cdot S}{\gamma - 1}$$

мұндағы ψ - арнадан ортаға жылуды шығару коэффициенті.

Джоуль энергиясының бөліну күші өткізгіштікпен және арна элементіндегі кернеуліктің E_j проекциясымен анықталады.

$$N_j = \gamma \cdot E^2 \cdot l$$

Сонда арна элементі үшін энергия балансының теңдеуін былай жазуға болады:

$$\frac{1}{\gamma - 1} \frac{d(P \cdot S)}{dt} + P \frac{dS}{dt} + \psi \frac{P \cdot S}{\gamma - 1} = \gamma \cdot E^2$$

Бөлу арнасының күйінің өзгеруі келесі параметрлермен анықталады: тиімді адиабаталық көрсеткіш және арнадан қоршаған материалға жылуды алу коэффициенті ψ . Адиабаталық көрсеткіш арнадағы электр өрісі энергиясының арна плазмасының ішкі энергиясына айналатын бөлігін анықтайды.

Нәтижелер мен талқылаулар

Модель бес параметрді қамтиды: E_c , a , χ , ζ , γ_0 олар электродаралық саңылау геометриясымен, кернеу параметрлерімен, сондай-ақ кеңістікте таралатын өткізгіштікпен, өткізгіштігі мен көлемдік заряд, разрядтың кеңістіктік-уақыттық және ток сипаттамаларын анықтайды. Модель параметрлері жеткілікті анық физикалық интерпретацияға ие және оптикалық бақылаулар мен ағымдағы өлшемдер арқылы бағалануы мүмкін. Критикалық өріс кернеулігі E_c тұрақсыздықтың даму шегі (разрядтың тұтану күші) болып табылады. E_c шамасының ұлғаюы тармақтар санының азаюына және разрядтық құрылымның арналарының түзелуіне әкеледі. E_c ұлғаюы тармақтар санының

азаюына және разрядтық құрылымның арналарының түзелуіне әкеледі. Осу жылдамдығы параметрі α арнаның осу ықтималдығының тығыздығын жергілікті электр өрісінің энергия тығыздығына байланыстырады. ұлғаюы арналардың осу қарқынының артуына әкеледі. Өткізгіштіктің χ және χ ұлғаюы мен төмендеуінің параметрлері разрядтық арнаның бірлік ұзындықтағы өткізгіштігінің өзгеруін ондағы Джоуль энергиясының бөліну қуатымен байланыстырады. ζ кері мәні разрядтық арнаның релаксация уақытына тең (энергияның бөлінуі аяқталғаннан кейін арнадағы өткізгіш күйдің болуының сипаттамалық уақыты). χ параметрінің жоғарылауы және χ төмендеуі разрядтық арналардың өткізгіштігінің жоғарылауына және арналар бойындағы кернеудің төмендеуіне әкеледі. Нәтижесінде E_n арналардың ұштарында ұлғаяды және олардың осуі тездейді. Бастапқы өткізгіштік γ_0 диэлектрик-плазмалық фазалық ауысу кезінде жаңа ғана пайда болған өткізгіш арнаның күйін сипаттайды. γ_0 ұлғаюы жаңадан пайда болған арналардың өткізгіштігінің жоғарылауының үдеуіне әкеледі, бірақ бұрыннан бар арналардың γ -іне әсер етпейді.

Модельдік параметрлердің мәндері диэлектриктің түріне және разрядтың дамуы кезінде диэлектрик пен каналдарда болатын процестердің сипатына байланысты. Модель параметрлерінің мәндерін микроскопиялық процестерді егжей-тегжейлі талдау арқылы немесе разрядтың дамуын эксперименттік зерттеулер барысында алынған модельдеу нәтижелері мен деректерді салыстыру негізінде анықтауға болады. Біз екінші әдісті қолдандық: модель параметрлерінің мәндері разряд дамуының тәжірибелік жазылған кеңістік-уақыт пен ағымдағы сипаттамаларын сипаттайтындай етіп таңдалады.

Қорытынды

Осылайша, бетонның сипаттамаларын, арматуралық тордың геометриясын және электрод жүйесінің геометриясын ескере отырып, бетондағы разрядтық арналарды бастау және дамытудың стохастикалық-детерминирленген моделі жасалды. Шығару арналарының инициациясын модельдеу тұрақсыздықты дамытудың стохастикалық-детерминирленген тәсіліне негізделген: дамып келе жатқан арналар бойымен және материалда электродтардағы зарядтардың көмегімен пайда болған зарядтардың қозғалысы және өрістің қайта бөлінуі ток үзіліссіздігі, Ом, Пуассон теңдеулерімен сипатталған, ал әрбір нүктеде диэлектриктің өткізгіш күйге (плазмаға) өту ықтималдығы жинақталған энергияның тығыздығымен анықталады, яғни, өріс кернеулігінің квадратымен. Осылайша, электр өрісінің таралуымен байланысты процестер сызықтық емес интегро-дифференциалдық теңдеулер негізінде детерминирленген түрде қарастырылады. Разрядтың даму сипаты, арна кедергісінің өзгеруі және оның кеңеюі энергияның бөлінуімен анықталатындықтан, бұл теңдеулер нақты импульстік генератор тізбегіндегі өтпелі процестің теңдеулерімен дәйекті түрде шешіледі.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеулер Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің қаржыландыруымен С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінде жүргізілді (АПО9058149 гранты. Темірбетон бұйымдары мен қатты калдықтардың электр разрядтарын жоюды зерттеу. оларды өңдеу және кәдеге жарату үшін жылжымалы кешен әзірлеу).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Семкин, Б. В., Усов, А. Ф., Курец, В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.

2 Кузнецова, Н. С., Буркин, В. В., Лопатин, В. В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках // Журнал технической физики. – Т. 79. – Вып. 5. – 2009. – С. 42–48.

3 Буркин, В. В. Особенности взрывного воздействия при импульсном электрическом пробое прочных сред // Физика горения и взрыва. – № 4. – 1985. – С. 113–118.

4 Kuznetsova, N. S., Burkin, V. V., Lopatin, V. V. Dynamics of electro burst in solids. II. Characteristics of wave process // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – № 23. – P. 235209.

5 Протасов, Ю. И. Разрушение горных пород – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 453 с.

6 Bluhm, H., Frey, W., Giese, H., Hoppe, P., Schultheis, C., Sträbner R. (2000). Application of Pulsed HV Discharges to Material Fragmentation and Recycling. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2000. – Vol. 7, No. 5. – P. 625–636.

7 Jae-Ou Chae, Young-Jun Jeong, Shmelev V.M., Denicaev A.A., Poutchkov V.M., Ravi V. (2006). Plasma Discharge Initiation of Explosives in Rock Blasting Application: A Case Study // Plasma Science & Technology. – 2006. Vol. 8, No. 4. DOI: 10.1088/1009-0630/8/4/16.

8 Сарсикеев, Е. Ж. Моделирование электровзрыва в системе накладных электродов с формированием откольной воронки // Аллея науки. – 2019. № 8 (35). – С. 1–7.

9 Кузнецова, Н. С., Мустафина, Р. М., Сарсикеев, Е. Ж. Численная реализация физико-математической модели электровзрыва в конденсированных средах // Вестник Павлодарского государственного университета. Серия Энергетическая. – 2016. – №3. С. 87–97.

10 Сарсикеев, Е. Ж., Кузнецова, Н. С., Мустафина, Р. М. Волновая динамика и разрушение при электровзрыве в твердых телах в

электроразрядных технологиях // Вестник Павлодарского государственного университета. Серия Энергетическая. – 2015. – № 3. – С. 63–72.

REFERENCES

1 **Semkin, B. V., Usov, A. F., Kurets, V. I.** Osnovy elektroimpul'snogo razrusheniya materialov. [Fundamentals of electropulse destruction of materials.] // – SPb.: Nauka, 1995. – 276 p.

2 **Kuznetsova, N. S., Burkin, V. V., Lopatin, V. V.** Volnovaya dinamika elektrovzryva v tverdyh dielektrikah [Wave dynamics of electric explosion in solid dielectrics] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – T. 79. – Vyp. 5. – 2009. – P. 42–48.

3 **Burkin, V. V.** Osobennosti vzryvnogo vozdeystviya pri impul'snom elektricheskom proboe prochnykh sred [Peculiarities of explosive action during pulsed electrical breakdown of strong media] // Fizika goreniya i vzryva. - No. 4. – 1985. – P. 113–118.

4 **Kuznetsova N.S., Burkin V.V., Lopatin V.V.** [Dynamics of electroburst in solids. II. Characteristics of wave process] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – No. 23. – P. 235209.

5 **Protasov Yu.I.** Razrushenie gornykh porod [Destruction of rocks] - M. : Izd-vo MGGU, 2001. – 453 p.

6 **Bluhm H., Frey W., Giese H., Hoppe P., Schultheis C., Sträbner R.** (2000). Application of Pulsed HV Discharges to Material Fragmentation and Recycling. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2000. - Vol. 7, no. 5. – P. 625–636.

7 **Jae-Ou Chae, Young-Jun Jeong, Shmelev V.M., Denicaev A.A., Poutchkov V.M., Ravi V.** (2006). Plasma Discharge Initiation of Explosives in Rock Blasting Application: A Case Study // Plasma Science & Technology. – 2006. Vol. 8, no. 4. DOI: 10.1088/1009-0630/8/4/16.

8 **Sarsikeev, E. Zh.** Modelirovanie elektrovzryva v sisteme nakladnykh elektrodov s formirovaniem otkol'noj voronki [Simulation of an electric explosion in a system of overhead electrodes with the formation of a spall funnel] // Alleya nauki. – 2019. No. 8 (35). – P. 1–7.

9 **Kuznetsova, N. S., Mustafina, R. M., Sarsikeev, E. Zh.** Chislennaya realizaciya fiziko-matematicheskoy modeli elektrovzryva v kondensirovannykh sredah [Numerical implementation of the physical and mathematical model of electric explosion in condensed media] // Vestnik Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energeticheskaya. – 2016. – No. 3. P. 87–97.

10 **Sarsikeev, E. Zh., Kuznetsova, N. S., Mustafina, R. M.** Volnovaya dinamika i razrushenie pri elektrovzryve v tverdyh telah v elektrorazryadnykh tekhnologiyah [Wave dynamics and destruction during electric explosion in solids

in electric discharge technologies] // Vestnik Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energeticheskaya. – 2015. – №3. – P. 63–72.

Материал баспаға 15.09.22 түсті.

*Е. Ж. Сарсикеев¹, А. К. Оразбекова², Г. О. Сұлжйменова³

^{1,2,3}Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина,

Республика Казахстан, г. Астана.

Материал поступил в редакцию 15.09.22.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ЗАЖИГАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В БЕТОНЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ

В данной статье представлены результаты работы по созданию модели разрядной цепи высоковольтного импульсного генератора на основе эквивалентной схемы, содержащей генерирующий конденсатор, сопротивление, индуктивность и нагрузку (плазменный канал). Модель основана на уравнениях Кирхгофа для разрядной цепи и уравнении Ромпе-Вайцеля для расчета изменения сопротивления разрядного канала. Работа генератора определяется емкостью, активным сопротивлением цепи, индуктивностью, начальным напряжением, до которого заряжена емкость генератора. Значения емкости и напряжения определяют запасенную емкостным накопителем энергию. На канальной стадии емкость и индуктивность определяют осциллирующий характер колебаний в цепи генератора. Моделирование инициирования разрядных каналов основано на стохастически-детерминистическом подходе развития неустойчивостей: движение зарядов и перераспределение поля, созданного зарядами на электродах, вдоль развивающихся каналов и в материале, описывается уравнениями непрерывности тока, Ома, Пуассона, а вероятность перехода диэлектрика в проводящее состояние (плазму) в каждой точке определяется плотностью запасенной энергии, т.е. квадратом напряженности поля. Процессы, связанные с распределением электрического поля, таким образом, рассматриваются детерминистически на основе нелинейных интегро-дифференциальных уравнений. Поскольку характер развития разряда, изменение сопротивления канала и его расширение определяются выделением энергии, то эти уравнения согласованно решаются с уравнениями переходного процесса в схеме реального импульсного генератора.

Ключевые слова: бетон, разрушение, электрический разряд, канал, взрыв, генератор напряжения, импульс, напряжение, электроды.

*Ye. Zh. Sarsikeye¹, A. K. Orazbekova², G. O. Suleimenova³

^{1,2,3}S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Material received on 15.09.22.

CREATING A MODEL OF IGNITION AND DEVELOPMENT OF ELECTRIC DISCHARGE IN CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE

This article presents the results of the work on creating a model of the discharge circuit of a high-voltage pulse generator based on an equivalent circuit containing a generating capacitor, resistance, inductance and load (plasma channel). The model is based on the Kirchhoff equations for the discharge circuit and the Rompe-Weitzel equation for calculating the change in the resistance of the discharge channel. The operation of the generator is determined by the capacitance, the active resistance of the circuit, the inductance, the initial voltage to which the generator capacitance is charged. The capacitance and voltage values determine the energy stored in the capacitive storage. At the channel stage, capacitance and inductance determine the oscillating nature of oscillations in the generator circuit. The simulation of the initiation of discharge channels is based on the stochastic-deterministic approach to the development of instabilities: the movement of charges and the redistribution of the field created by the charges on the electrodes, along the developing channels and in the material, is described by the equations of current continuity, Ohm, Poisson, and the probability of the transition of the dielectric to a conducting state (plasma) at each point is determined by the density of stored energy, i.e. the square of the field strength. The processes associated with the distribution of the electric field are thus considered deterministically on the basis of non-linear integro-differential equations. Since the nature of the development of the discharge, the change in the resistance of the channel and its expansion are determined by the release of energy, these equations are consistently solved with the equations of the transient process in the circuit of a real pulse generator.

Keywords: concrete, destruction, electric discharge, channel, explosion, voltage generator, impulse, voltage, electrodes.

Теруге 15.09.2022 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2022 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
3 Mb RAM
Шартты баспа табағы 19,8. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова
Корректор: А. Р. Омарова
Тапсырыс № 3989

Сдано в набор 15.09.2022 г. Подписано в печать 30.09.2022 г.
Электронное издание
3 Mb RAM
Усл. печ. л. 19,8. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова
Корректор: А. Р. Омарова
Заказ № 3989

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz