

MATEMATYCZNE METODY OCENY WPŁYWU PROCESÓW PRZEDSIĘWNEJ STYMULACJI NA KIEŁKOWANIE NASION

Bożena Gładyszewska

Katedra Fizyki, Akademia Rolnicza, ul. Akademicka 13, 20-033 Lublin
e-mail: broz@ursus.ar.lublin.pl

Streszczenie. W pracy opisane są matematyczne modele umożliwiające dokonanie oceny żywotności nasion na podstawie kinetyki procesu ich kiełkowania. Poza podstawowymi metodami, jak zastosowanie rozkładów statystycznych Gaussa i Rayleigha, przedstawiono model analityczny i model symulacyjny. W dotychczasowych zastosowaniach opisanych modeli zawsze występowała zgodność krzywych doświadczalnych i modelowych, a odtworzone na podstawie symulowanych rezultatów krzywe intensywności kiełkowania odzwierciedlały również rozrzut statystyczny wyników doświadczalnych.

Słowa kluczowe: stymulacja, kiełkowanie nasion, matematyczne modelowanie

WSTĘP

Jednym z podstawowych kryteriów oceny nasion jest ich żywotność, to znaczy zdolność do aktywnego i utajonego życia, a co się z tym wiąże, zdolność do kiełkowania. Zdolność kiełkowania możemy oznaczyć metodami biochemicznymi (biologicznymi), biofizycznymi lub metodami fizjologicznymi [7]. Metody fizjologiczne są metodami powszechnie przyjętymi i stosowanymi przez wszystkie stacje oceny nasion (SON) w skali światowej i polegają na wywołaniu kiełkowania nasion w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Stymulacja należy do tych zabiegów przygotowujących nasiona do siewu, które mają pozytywny wpływ nie tylko na znaczne przyspieszenie kiełkowania nasion, ale również na uzyskanie wysokich, dobrej jakości plonów.

Od lat znana jest rolnikom poprawa materiału siewnego światłem słonecznym. Podobny efekt można uzyskać poprzez naświetlanie nasion intensywnym światłem lamp żarowych [9]. Na kiełkowanie i wzrost roślin wpływa pozytywnie nie tylko światło białe, ale także promieniowanie laserowe [2,3], pole magnetyczne [12-18], promieniowanie mikrofalowe [10].

Istotne jest by w ocenie zdolności kiełkowania opierać się o metody pozwalające na ściśle charakteryzowanie procesu kiełkowania zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych. Taki opis procesu kiełkowania możliwy jest tylko wtedy, gdy zastosowane zostanie matematyczne modelowanie badanego procesu. Parametry zastosowane w takim modelu pozwalają na uzyskanie precyzyjnych relacji między wynikami uzyskanymi w laboratorium i w doświadczeniach polowych.

Szczególnie ważne staje się to w przypadku badania wpływu różnych czynników biologicznych, fizycznych i chemicznych np. zanieczyszczeń [21-22], zwiększonego zasolenia [1], temperatury [19], oświetlenia [8] na żywotność nasion. Należy podkreślić, że różnice między kinetyką kiełkowania nasion grupy kontrolnej i nasion badanych są często niewielkie, a ich interpretacja wymaga jednoznacznie matematycznego modelowania.

Wybrane rozkłady statystyczne (Gaussa i Rayleigha), jak również specjalnie w tym celu opracowane modele matematyczne (analityczny i symulacyjny) były zastosowane do analizy procesu kiełkowania nasion różnych roślin naświetlanych światłem lasera He-Ne [2,3,5]. Model analityczny z powodzeniem był również wykorzystywany przez Pietruszewskiego i in. [12-16] do opisu krzywych kiełkowania nasion stymulowanych polem magnetycznym.

STANDARDOWE METODY OCENY ŻYWOTNOŚCI NASION

Zalecane przez normy (PN-65950) metody fizjologiczne są metodami powszechnie przyjętymi i stosowanymi przez wszystkie stacje oceny nasion (SON) w skali światowej. Polegają one na wywołaniu kiełkowania w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Zdolność kiełkowania można zdefiniować wzorem:

$$Z_k = \frac{n_k}{n_c} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdzie: n_k jest liczbą nasion wykiełkowanych, n_c jest liczbą wszystkich wysianych nasion.

Normy zalecają także wyznaczenie szybkości kiełkowania, zdefiniowanej jako:

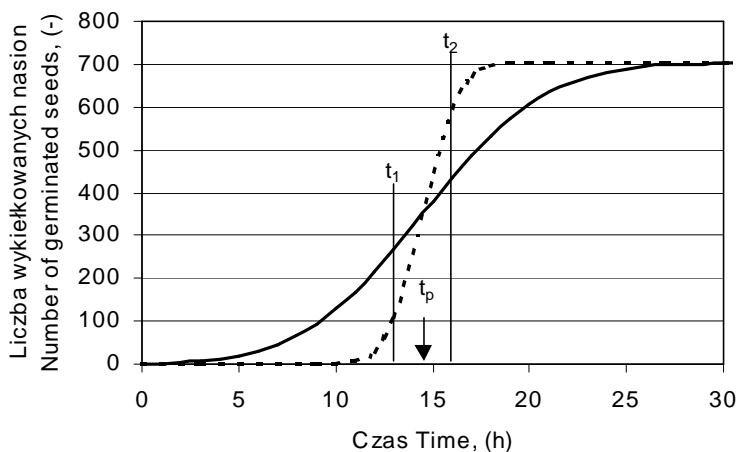
$$E_k = \frac{n(t_1)}{n_c} \cdot 100 \% \quad (2)$$

gdzie: $n(t_1)$ jest liczbą nasion wykiełkowanych w czasie pierwszego przeliczenia. Zgodnie z propozycją Piepera [11] średni czas potrzebny do wykiełkowania jednego nasiona wyraża się, jako średnią ważoną:

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (3)$$

gdzie: n_i – liczba nasion kiełkujących w danych przedziałach czasu, $i = 1, 2, 3, \dots, n_k$, t_i – czas kiełkowania nasion, t_p – średni czas potrzebny do wykiełkowania jednego nasiona.

Już wstępne badania wykazały [2,3], że metody zalecane przez Polską Normę sprawiają, iż sposób oceny żywotności nasion jest mało dokładny. Nieścisłości terminu określania energii kiełkowania, a także fakt, iż średni czas kiełkowania nasion t_p , określany za Pieperem jest niezależny od tego, jaka jest szybkość kiełkowania w czasie wskazują na to, iż naukowe podejście do opisu procesu kiełkowania powinno być oparte na parametrach wynikających ze ścisłych modeli, gdyż w zależności od wyboru terminu „pierwszego” zliczenia wykiełkowanych nasion rezultat obliczeń energii kiełkowania może prowadzić do całkowicie sprzecznych wniosków. Rysunek 1 przedstawia przykładowe zależności liczby wykiełkowanych nasion w czasie, które reprezentowane są przez ten sam średni czas kiełkowania t_p , jak również tę samą zdolność kiełkowania Z_k . Szybkość kiełkowania wyznaczona dla czasu t_p prowadzi również do identycznych wartości. Szybkość kiełkowania określona dla arbitralnie wybranego czasu t_1 jest wyższa dla krzywej (a), podczas gdy szybkość kiełkowania określona dla czasu t_2 jest wyższa dla krzywej (b). Potwierdza to nieścisłość analizy żywotności nasion zalecanej przez normę PN-65950.



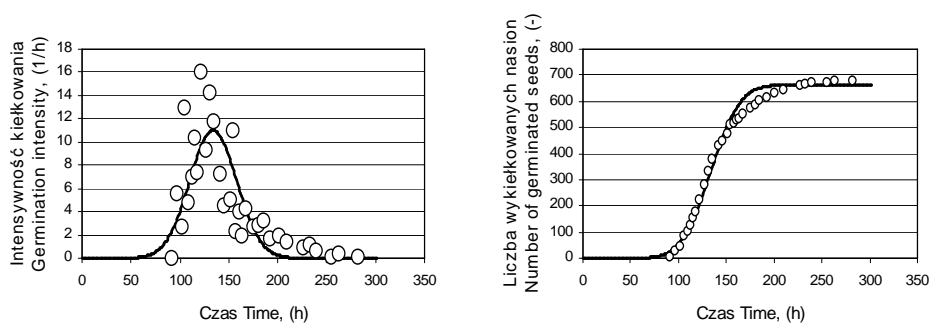
Rys. 1. Przykładowe zależności liczby wykiełkowanych nasion w czasie, które reprezentowane są przez ten sam średni czas kiełkowania t_p , jak również tę samą zdolność kiełkowania $Z_k = 89\%$

Fig. 1. Exemplary relationship of germination numbers in time, represented by the same mean germination time t_p as well as by the same germination efficiency $Z_k = 89\%$

ZASTOSOWANIE ROZKŁADÓW STATYSTYCZNYCH GAUSSA I RAYLEIGHA

W związku z występującymi, nieznacznymi różnicami pomiędzy parametrami określającymi żywotność nasion stymulowanych i niestymulowanych, zależności intensywności kiełkowania i liczby wykiełkowanych nasion od czasu mogą być opisywane przy pomocy odpowiednich rozkładów statystycznych, np. rozkładu Gaussa (rys. 2), który będąc rozkładem symetrycznym względem wartości średniej, wyróżnia się bardzo prostą i klarowną interpretacją parametrów: wartości średniej t_{sr} (odpowiadającej średniemu czasowi kiełkowania nasion, a także momentowi najintensywniejszego kiełkowania nasion) oraz standardowego odchylenia od wartości średniej σ (która charakteryzuje rozciągłość w czasie procesu kiełkowania). Rozkład Gaussa ma postać:

$$n_G(t) = \frac{n_k}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-t_{sr})^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$



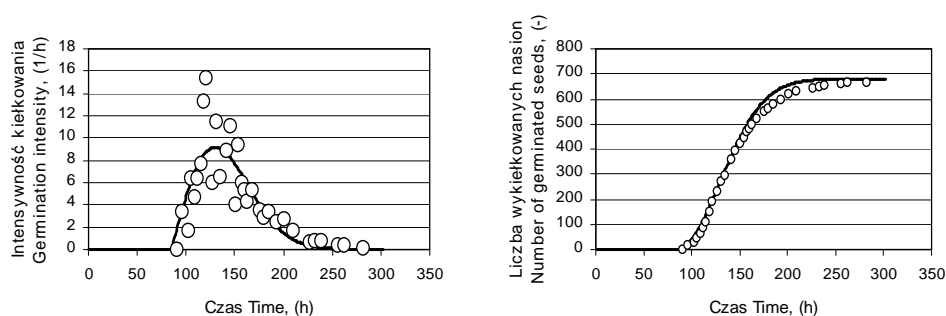
Rys. 2. Doświadczalne zależności intensywności kiełkowania oraz liczby wykiełkowanych nasion uzyskane w temperaturze 15°C ($Z_k = 85\%$) dla nasion pomidorów stymulowanych laserowo dawką 4,5 mJ. Rezultatom doświadczalnym (o) towarzyszą wpisane metodą najmniejszych kwadratów zależności odpowiadające rozkładowi Gaussa (linia ciągła)

Fig. 2. Experimental dependencies (o) of germination intensities and number of germinations obtained at 15°C ($Z_k = 85\%$) for 4.5 mJ laser stimulated tomatoes seeds. The experimental results are accompanied by gaussian distributions (solid line)

Drugi z rozkładów – rozkład Rayleigha – wyróżnia się charakterystyczną asymetrią, obserwowaną także w wynikach eksperymentalnych, przedstawionych na rysunku 3. Rozkład Rayleigha ma następującą postać:

$$n_R(t) = \frac{n_k \cdot (t-t_0)}{\beta^2} \cdot e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\beta^2}} \quad (5)$$

gdzie: β – parametr rozkładu decydujący o jego rozciągłości w czasie. Rozkład ten wynika z założenia, że prawdopodobieństwo wykiełkowania nasiona w przedziale czasu $(t, t+dt)$ jest równe $\Phi(t)dt$, gdzie $\Phi(t)=t/\beta^2$, czyli rośnie liniowo z czasem. Ponieważ, początek kiełkowania nie następuje natychmiast po wysianiu, konieczne staje się wprowadzenie dodatkowego parametru, umożliwiającego uwzględnienie tego faktu eksperymentalnego: t_0 – czas trwania rozwoju utajonego, poprzedzającego etap formowania kiełka.



Rys. 3. Doświadczalne zależności intensywności kiełkowania oraz liczby wykiełkowanych nasion uzyskane w temperaturze 15°C ($Z_k = 85\%$) dla nasion pomidorów stymulowanych laserowo dawką 4,5 mJ. Rezultatom doświadczalnym (o) towarzyszą wpisane metodą najmniejszych kwadratów zależności odpowiadające rozkładowi Rayleigha (linia ciągła)

Fig. 3. Experimental dependencies (o) of germination intensities and number of germinations obtained at 15°C ($Z_k = 85\%$) for 4.5 mJ laser stimulated tomatoes seeds. The experimental results are accompanied by Rayleigh's distribution (solid line)

MODEL ANALITYCZNY

Szczegółową ocenę żywotności nasion można uzyskać przez zastosowanie modelu analitycznego [2]. Opierając się na rozumowaniu wynikającym z obserwacji doświadczalnej postawiono hipotezę roboczą: względna szybkość kiełkowania nasion jest proporcjonalna do różnicy między końcową liczbą wykiełkowanych nasion n_k , a liczbą nasion $n(t)$ wykiełkowanych po danym czasie t :

$$\frac{1}{n(t)} \cdot \frac{dn}{dt} = \alpha_p \cdot (n_k - n(t)) \quad (6)$$

gdzie: α_p – empirycznie wyznaczany współczynnik proporcjonalności. Hipoteza ta wynika z analogii procesu kiełkowania do procesów wzrostu dowolnych obiektów lub systemów opisywanych funkcją logistyczną. Podejście takie sugerują obserwacje doświadczalne kiełkowania. Rozwiązując równanie 6 przy założeniu początkowym $n(t = t_0) = 1$ (w takim przypadku za chwilę t_0 przyjmujemy czas,

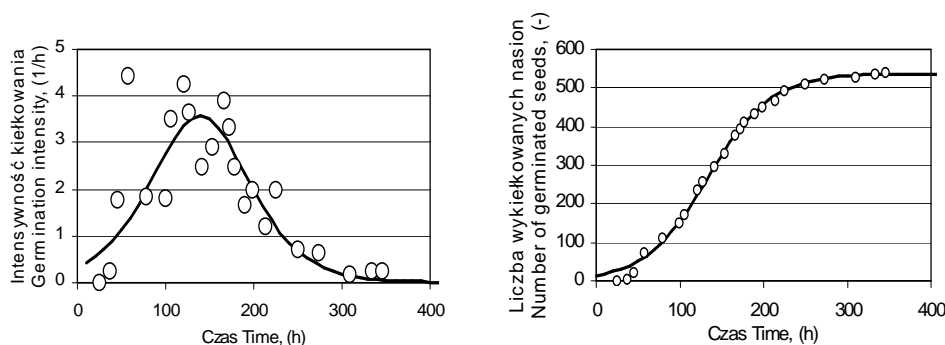
po którym wykiełkowało jedno nasiono) otrzymujemy równanie analogiczne do znanego z teorii kinetyki populacji prawa Verhulsta-Pearla, ale opisujące liczbę kiełkujących nasion w czasie:

$$n(t) = \frac{n_k}{1 + (n_k - 1) \cdot e^{-\alpha_p \cdot n_k \cdot (t-t_0)}} \quad (7)$$

Współczynnik α_p decyduje o rozciągłości krzywej kiełkowania w czasie, zaś t_0 charakteryzuje czas wyjścia z etapu utajonego rozwoju nasiona i rozpoczęcie etapu formowania kiełków. Zaproponowany w pracy [2] model analityczny był następnie z powodzeniem wykorzystywany do opisu krzywych kiełkowania nasion różnych roślin:

- naświetlanych światłem lasera He-Ne [2,3,5]
- poddanych działaniu stałego i zmiennego pola magnetycznego, a także pola elektrycznego [12-16]

Na rysunku 4 pokazano przykładowe zastosowanie krzywej logistycznej do opisu kiełkowania nasion papryki stymulowanych laserowo.



Rys. 4. Doświadczalne zależności intensywności kiełkowania oraz liczby wykiełkowanych nasion uzyskane w temperaturze 20°C ($Z_k = 92\%$) dla nasion papryki stymulowanych laserowo dawką 7,5 mJ (o) oraz zależności wynikające z analitycznego modelu procesu kiełkowania (linia ciągła)

Fig. 4. Experimental dependencies (o) of germination intensities and number of germinations obtained at 20°C ($Z_k = 92\%$) for 7.5mJ stimulated paprika seeds and theoretical ones given by the analytical model (solid line)

MODEL SYMULACYJNY (METODA MONTE CARLO)

Jedynym modelem, pozwalającym na interpretację wszystkich doświadczalnych krzywych kiełkowania (uzyskanych w różnych warunkach kiełkowania) jest model symulacyjny [2], wykorzystujący metodę Monte Carlo, opierający się

o przesłanki teoretyczne wynikające z fizjologii nasion, sugerujące, iż proces kiełkowania składa się z trzech sukcesywnie następujących po sobie etapów: fizycznego, biochemicznego i fizjologicznego. Model ten zakłada, że prawdopodobieństwo wyjścia nasiona z każdego etapu rozwoju jest określone oraz, że proces kiełkowania ma charakter sukcesywny, tzn. nasiono nie może przejść np. do etapu fizjologicznego bez wcześniejszego wyjścia z etapu fizycznego. Proces kiełkowania symulowany jest dla różnych prawdopodobieństw przejścia nasiona do etapu wyższego: p_{0-1} , p_{1-2} , p_{2-3} , przy czym prawdopodobieństwo p_{2-3} jest prawdopodobieństwem, że nasiono uformuje kielek, czyli zostanie uznane za wykiełkowane. Prawdopodobieństwa te nie są prawdopodobieństwami zdarzeń niezależnych, zatem ich suma nie musi być równa jedności. Na podstawie opisanego modelu opracowano program komputerowy „Mc-Kieł”, który po wprowadzeniu parametrów wejściowych rozpoczyna procedurę symulacji procesu kiełkowania, korzystając z generatora liczb losowych o rozkładzie równomiernym.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowy rozwój kiełkowania 10 nasion, gdzie stan 0 odpowiada stanowi uspienia nasiona, stan 1 pierwszemu etapowi (fizycznemu), 2 – drugiemu etapowi (biochemicznemu), zaś 3 oznacza nasiono, które uformowało kielek.

Tabela 1. Przykładowy rozwój w czasie t symulowanej próbki $n = 10$ nasion dla parametrów symulacji: $p_{0-1} = 0.2$, $p_{1-2} = 0.5$, $p_{2-3} = 0.3$, $Z_k = 90\%$, $t_0 = 0$

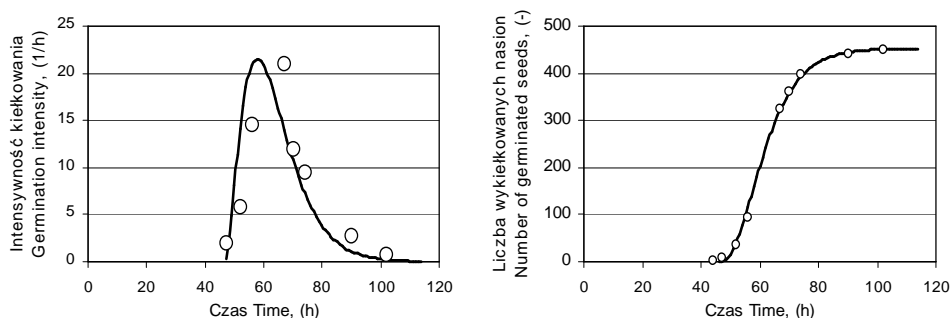
Table 1. Exemplary simulation of germination effects of $n=10$ seeds for following simulation parameters: $p_{0-1}=0.2$, $p_{1-2}=0.5$, $p_{2-3}=0.3$, $Z_k=90\%$, $t_0=0$. Symbol t indicates consecutive time intervals after which seeds are counted

$t =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n =										
1	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3
2	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	2	2	2	3	3
5	0	1	1	1	2	2	3	3	3	3
6	0	0	0	0	1	1	2	3	3	3
7	0	0	0	1	1	2	2	2	2	3
8	0	1	2	2	3	3	3	3	3	3
9	0	0	1	2	2	2	3	3	3	3
10	0	0	0	1	1	2	2	2	3	3

Również model symulacyjny znalazł zastosowanie w analizie krzywych kiełkowania nasion:

- stymulowanych światłem lasera He-Ne np. nasion rzodkwi [3]
- stymulowanych polem magnetycznym i elektrycznym, np. nasion gryki [16], nasion pszenicy [17].

Rysunek 5 przedstawia przykładowe krzywe uzyskane na podstawie modelu Monte Carlo dla nasion pszenicy poddanych działaniu zmiennego pola magnetycznego [17]. Widoczna dobra zgodność wyników doświadczalnych i symulowanych potwierdza użyteczność omówionego modelu.



Rys 5. Doświadczalne zależności intensywności kiełkowania oraz liczby wykiełkowanych nasion ($Z_k = 92\%$) uzyskane dla nasion pszenicy stymulowanych zmiennym polem magnetycznym. Rezultatом doświadczalnym (o) towarzyszą zależności wpisane przy użyciu programu "McKieł", wynikające z modelu symulacyjnego (linia ciągła)

Fig. 5. Experimental dependencies (o) of germination intensities and number of germinations ($Z_k = 92\%$) obtained for wheat seeds stimulated by alternating magnetic field. The experimental results are accompanied by the dependencies entered by means of the program 'McKieł', resulting from the simulation model (solid line)

WNIOSKI

1. Poza standardowymi metodami oceny żywotności nasion naświetlanych przedsięwzięciem światłem lasera He-Ne, do opisu procesu kiełkowania można zastosować rozkłady statystyczne Gaussa i Rayleigha.

2. Model analityczny sformułowany na bazie zaproponowanej hipotezy poprawnie opisuje kinetykę kiełkowania nasion różnych roślin poddanych przedsięwzięciu działaniu światła laserowego, pola magnetycznego i elektrycznego.

3. W każdym przypadku rezultaty doświadczalne były najwierniej odwzorowywane poprzez zależności wynikające z modelu symulacyjnego.

PIŚMIENNICTWO

1. **Foolad M.R., Chen F.Q., Lin G.Y.:** RFLP mapping of QTLs conferring salt tolerance during germination in an interspecific cross of tomato. *Theor. Appl. Genet.*, 97, 1133, 1998.
2. **Gładyszewska B.:** Ocena wpływu przedsięwzięcia laserowej biostymulacji nasion pomidorów na proces ich kiełkowania. Rozprawa doktorska, Wydz. Techniki Rolniczej AR w Lublinie, 1998.

3. **Gładyszewska B., Koper R.:** Monte Carlo simulation of the seed germination process. Annual Review of Agricultural Engineering, z. 2 (1), 91-98, 2000.
4. **Gładyszewska B., Koper R., Gładyszewski G.:** Modelowanie procesu kiełkowania nasion rzodkwi. Acta Agrophysica, 58, 79-87, 2001.
5. **Gładyszewska B., Koper R., Kornarzyński K.:** Matematyczny model procesu kiełkowania nasion. Inżynieria Rolnicza 2, 7-12, 1999.
6. **Gładyszewski G.:** Program komputerowy "McKieł". Instytut Fizyki, Politechnika Lubelska, 1999.
7. **Grzebiuk S, Kulka S.:** Fizjologia i biochemia nasion. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 1981.
8. **Keith D.A.:** Combined effects of heat shock, smoke and darkness on germination of *Eucalyptus stuartii*, an endangered fire-grone. Australian shrub. Oecologia 112, 340, 1997.
9. **Koper R., Kornas-Czuczwar B., Truchliński J., Zarebski W.:** Przedsięwzięta biostymulacja światłem białym nasion buraków cukrowych. Acta Agrophysica, 62, 41-47, 2002.
10. **Olchowiak G., Gawda H.:** Influence of microwave radiation on germination capacity of flax seeds. Acta Agrophysica, 62, 63-68, 2002.
11. **Pieper G, Eggebrecht H.:** Das Saatgut. Wydanie II, Berlin, 1952.
12. **Pietruszewski S.:** Modelowanie krzywa logistyczną kiełkowania nasion pszenicy odmiany Henika w polu magnetycznym. Acta Agrophysica, 58, 143-152, 2001.
13. **Pietruszewski S. Kornarzyński K.:** Kiełkowanie nasion pszenicy w stałym polu magnetycznym. Fragmenta Agronomica, 2 (70), 77-83, 2001.
14. **Pietruszewski S. Kornarzyński K.:** Wpływ pól magnetycznych na proces kiełkowania nasion. Inżynieria Rolnicza, 2, 1, 13-20, 1999.
15. **Pietruszewski S. Kornarzyński K., Łacek R.:** Germination of wheat seeds in alternating magnetic field. Int. Agrophysics, 15, 269-271, 2001.
16. **Pietruszewski S. Kornarzyński K., Gładyszewska B.:** Zastosowanie modelu analitycznego i symulacyjnego do opisu procesu kiełkowania nasion gryki poddanych przedsięwziętej biostymulacji polem elektrycznym i magnetycznym. Technica Agraria, 2(1), 3-12, 2003.
17. **Kornarzyński K., Pietruszewski S., Gładyszewska B., Łacek R.:** Ocena wpływu biostymulacji zmiennym polem magnetycznym na kiełkowanie nasion pszenicy w oparciu o zastosowanie modelu symulacyjnego. Mat. II Międzynarodowej Konferencji Naukowej "Agrolaser 2003", 117, 2003.
18. **Rochalska M.:** Poprawa jakości materiału siewnego za pomocą zmiennego pola magnetycznego. Doświadczenia polowe. Acta Agrophysica, 62, 113-126, 2002.
19. **Sthapit B.R., Witcombe J.R.:** Inheritance of Tolerance to Chilling Stress in Rice during Germination and Plumule Greening. Crop Sci., 38, 660, 1998.
20. **Taormina P.J., Beuchat L.R., Slutsker L.:** Infections Associated with Eating Seed Sprouts: An International Concern. Emerging Infectious Diseases, 5, 626, 1999.
21. **Yang Z.Y., Yuan J.G., Xin G.R., Chang H.T., Wong M.H.:** Germination, Growth, and Nodulation of *Sesbania rostrata* Grown in Pb/Zn Mine Tailings. Environmental Management, 21, 617, 1997.
22. **Zimmermann M., Sommer S., Pickert M., Kranz A.R., Gartenbach K., Bork U.:** Interim Results of an Experiment on Kosmos, Satellite with Arabidopsis Seeds Exposed in Space. Arabid. Inf. Serv., 26, 47, 1990.

B. GŁADYSZEWSKA

MATHEMATICAL METHODS USED TO DETERMINE INFLUENCE
OF THE PRESOWING STIMULATION PROCESSES
ON THE GERMINATION PROCESS

Bożena Gładyszewska

Department of Physics, University of Agriculture, ul. Akademicka 13, 20-033 Lublin
e-mail: broz@ursus.ar.lublin.pl

Abstract. Paper describes the mathematical models which enable to evaluate the viability of seeds on the basis of their germination kinetics. Beside the basic methods such as the application of Gauss and Rayleigh statistical distributions, the analytical and simulation models are presented. By the use models a good agreement between experimental and calculated results was obtained. When the simulation model was used results well reflected not only germination intensity curves but also the statistical spread of experimental data.

Key words: stimulation, germination of seeds, mathematical modeling