

## Контроль процесса активного вентилирования зерна

*Васильев А.Н., Северинов О.В.*

*Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства,*

**Аннотация:** В статье предпринята попытка обосновать необходимые контролируемые параметры процесса активного вентилирования зерна с целью сушки. Использован системный подход. Процесс сушки представлен в виде взаимодействия систем «агент сушки» и «зерновой» слой. С использованием компонентов теории информации произведена оценка информативности каждого из компонентов, входящих в систему и всей системы в целом на основании данных о состоянии зернового слоя. Установки активного вентилирования рассмотрены, как объекты с распределенными параметрами. Установлено, что для адекватного управления процессом активного вентилирования достаточно контроля начальных параметров сушильного агента до входа в плотный слой зерна.

**Ключевые слова:** зерно, элементарный слой, активное вентилирование, сушка, температура, влажность, агент сушки, информативность, энтропия, равновесие, бит.

### 1. Введение

Так как зерно это биологический объект, его состояние может изменяться. В этом случае обоснование контролируемых параметров невозможно без рассмотрения процессов, происходящих зерновом слое. Установив связь и взаимное влияние компонентов системы "внешняя среда" - "зерновой слой" - "средство контроля", достаточно точно определить параметры, которые необходимо контролировать в процессе активного вентилирования зерна.

### 2. Оценка информативности состояния зернового слоя

С кибернетической точки зрения интерес представляет информационно-функциональный подход к классификации систем [1]. При проектировании САУ любого процесса невозможно обойтись без применения средств контроля по принципу - входная информация, или измеряемая величина, преобразуется в выходную информацию, или результат измерения [2, 3]. Сам источник информации, при этом, может представлять собой сложную систему, состоящую из нескольких

---

компонентов. В случае рассмотрения процесса активного вентилирования, или сушки зерна, источник информации представляет собой комплекс, состоящий из агента сушки и зернового слоя, причем каждый из этих компонентов может быть рассмотрен в качестве отдельной независимой системы. Оценивать информацию, которая запасена источником, можно только после нахождения информативности каждого из компонентов источника.

Необходимо проанализировать информативность каждого компонента, входящего в комплекс "источник информации": атмосферный воздух (сушильный агент), зерновка (зерновая масса) и всего комплекса в целом.

Зерно, поступающее на зерноперерабатывающее предприятие в зависимости от его влажности может находиться в состоянии гипобиоза или во вторичной фазе мезобиоза. Если не принимать мер по снижению влажности, или охлаждению семян, то возможен переход, к активной жизнедеятельности зерновок, к биозу. Большое содержание воды, в том числе достаточный минимум свободной влаги, обеспечивает перенос веществ, активацию отдельных ферментов и ферментных систем [4]. Чтобы обеспечить качество зернового материала, необходимо снизить его влажность. Для каждой культуры семян определена критическая влажность, при превышении которой зерно переходит во вторичную фазу мезобиоза. Для основных зерновых культур критическая влажность лежит в пределах: для пшеницы - 13,5..15,5%; для кукурузы 12,5...13,5%; для гороха 16...17%. При влажности менее критической (для пшеницы от 14 до 8%) семена находятся в первичной стадии мезобиоза.

При дальнейшем обезвоживании зерновки происходит ее переход в состояние анабиоза. В этом состоянии нет нормального обмена веществ, поэтому саморегулирующая система клеток не действует. Нет и реакций этой системы на воздействия. Имеются лишь непосредственные изменения

---

вещества клеток под влиянием этих воздействий, без каких-либо саморегуляторных явлений. Т.е. обезвоживание семян до 8% и менее создает наиболее благоприятные условия для сохранения их технологических свойств, сводит к минимуму неопределенность состояния зерновки и зернового слоя в целом при хранении (т.е. обеспечивается минимум энтропии зернового слоя). С другой стороны - это приводит к дополнительным затратам на сушку и, в отдельных случаях, может привести к потере жизнеспособности семян. Дело в том, что при анабиозе сильно возрастает значение оболочек. Повреждение оболочек семян резко понижает их устойчивость, в частности усиливается доступ кислорода воздуха, что может интенсифицировать окислительные процессы, повышается поражаемость микроорганизмами. Т.е. перевод в состояние анабиоза травмированных при уборке семян может привести к потере их жизнеспособности, к разрушению их структуры и, как следствие, к возрастанию неопределенности состояния семян и зернового слоя в целом (возрастанию энтропии).

Очевидно, что нельзя оставлять без внимания и такой немаловажный параметр, влияющий на энтропию зерновки, каким является температура. Известно, что с увеличением температуры повышается и энтропия материала. Что, применительно к зерну, приводит к повышению интенсивности дыхания зерновой массы, и как следствие - к повышению ее влажности. Снижение же температуры зернового слоя приводит к снижению его энтропии, но для каждого интервала влажности семян допустима определенная минимальная температура.

Снижение же температуры ниже допустимой так же ведет к разрушению структуры. Очевидно, что минимальному значению влажности будет соответствовать и минимальная температура.

---

Зная значение критической влажности и оптимальной температуры и, поддерживая в данном интервале параметры зерновой массы, будем иметь минимальную остаточную информацию о системе "зерновка", т.е. разность  $I(X\Sigma) - T(X_i) \rightarrow \min$  стремится к минимуму,

где  $I(X\Sigma)$  - суммарная информация, запасенная зерновкой, бит;  $T(X_i)$  - информация, получаемая при измерении температуры и влажности семян, бит.

Влажность семян различных культур в период послеуборочной обработки может принимать различные значения в диапазоне от 8 до 40%. Если предположить равновероятность возникновения каждого значения в данном диапазоне с интервалом 1%, то максимальная информативность всего диапазона найдется, как [5]:

$$H(W) = \log_2 n = \log_2 32 = 5 \text{ бит}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество равновероятных событий.

Диапазон влажностей принято делить на участки. Для пшеницы их известно четыре: менее 14% - влажность, при которой обеспечиваются кондиционные свойства семян при хранении; 14...18% - влажность, при которой возможно длительное хранение семян с их предварительным охлаждением; 18...22% - влажность, при которой возможно безопасное хранение зерна в течение 2-х - 3-х суток, при его температуре не более 15°C; более 22% - влажность, при которой невозможно длительное хранение семян даже при их охлаждении, требуется немедленная сушка. Таким образом, максимальная информативность всего диапазона составит не более  $H(W) = \log_2 4 = 2$  бит.

В период послеуборочной обработки температура зерна, поступающего на зернопункты, в зависимости от температуры воздуха, может колебаться в пределах 10...25°C. Так же, как и диапазон влажности, диапазон температуры зерна можно разбить на участки, в соответствии с которыми может

---

изменяться очередность обработки семян, а также режим активного вентилирования. Для данного диапазона температур таких участков два: 10...20 °С, когда скорость протекания биологических процессов низка и 20...25 °С, при которой резко повышается интенсивность дыхания, максимальная информация о температуре зерна составит  $H(\Theta) = \log_2 2 = 1$  бит. Непосредственно после уборки, температуру и влажность семян можно принять взаимонезависимыми, поэтому суммарная максимальная энтропия от температуры и влажности найдется, как  $H(W_1\Theta) = H(W) + H(\Theta) = 3$  бит.

Другим компонентом комплекса "зерно - сушильный агент", в процессе активного вентилирования, является атмосферный воздух, используемый в качестве агента сушки. Для определения полной информации, которой обладает комплекс "зерно - сушильный агент", необходимо иметь сведения по информативности каждого из составных компонентов.

### **3. Оценка информативности атмосферного воздуха**

Известно, что состояние атмосферного воздуха очень отличается для различных природно-климатических зон страны в период уборки, и изменяется в течение суток. Поэтому проводились исследования таких закономерностей [6], поскольку от них может значительно зависеть эффективность разрабатываемых режимов и систем автоматического управления. Для определения параметров атмосферного воздуха и их изменчивости, в период уборки в данной зоне, был сделан анализ показателей метеорологической станции одного из районов Ростовской области с 10 июля по 10 сентября.

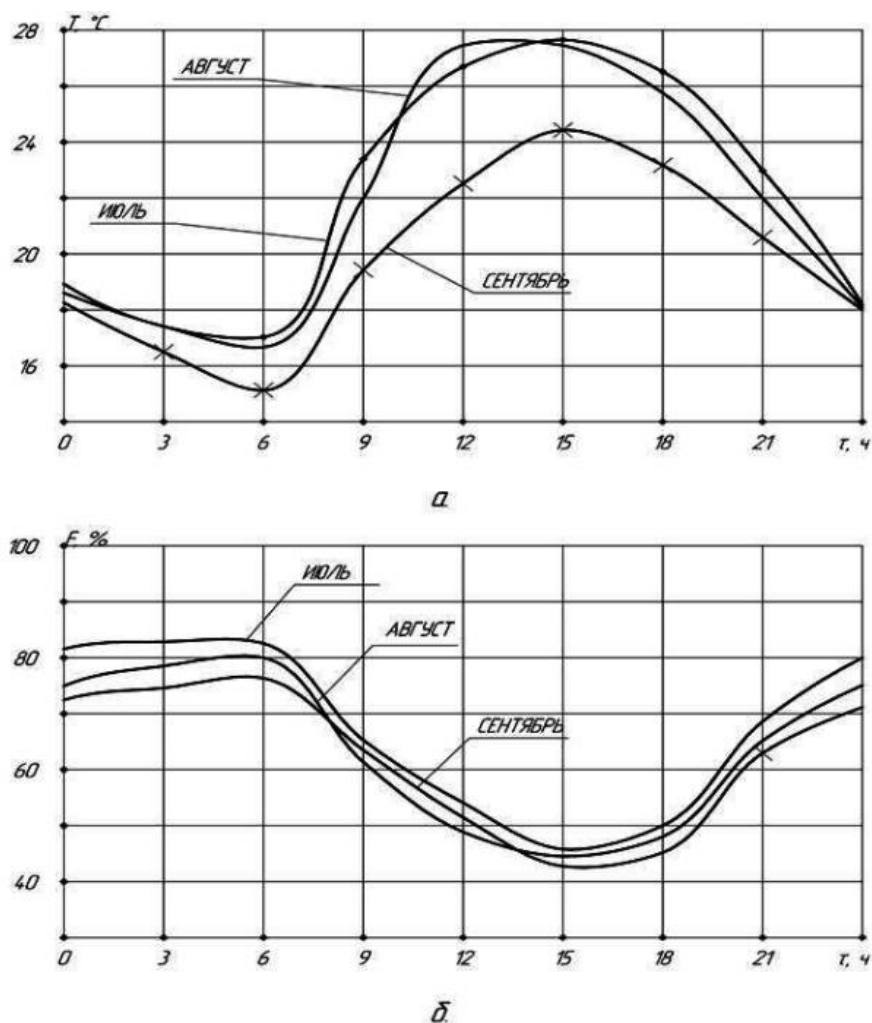


Рис. 1. – Изменение оценок математических ожиданий температуры и относительной влажности атмосферного воздуха в течение суток: а – изменение температуры; б – изменение относительной влажности

Изменение параметров воздуха можно характеризовать, как процесс случайного характера, поэтому при исследовании были использованы вероятностно-статистические методы [7, 8]. Математическое ожидания относительной влажности воздуха по выборкам за июль, август и сентябрь составили соответственно 66,1%, 62,8%, 61% и температуры 22,3°C, 22,7°C, 19,7°C, с доверительным интервалом для влажности соответственно за июль, август и сентябрь  $\pm 1,23\%$ ,  $1,01\%$ ,  $1,84\%$ , для температуры  $\pm 0,35^\circ\text{C}$ ,  $0,31^\circ\text{C}$ ,  $0,5^\circ\text{C}$  (при доверительной вероятности 0,95).

Возможность активного вентилирования зерна и скорость его сушки зависит от его относительной влажности атмосферного воздуха и температуры [9]. Были определены изменения оценок математического ожидания температуры и относительной влажности атмосферного воздуха в течение суток по месяцам.

Для определения закономерностей распределения случайных величин строились гистограммы пятилетних выборок по месяцам. Статистический ряд каждой выборки для каждого месяца делился на 10 разрядов, для влажности от 0 до 100%, для температуры от 0 до 35°C. Вероятности принадлежности относительной влажности в любое время суток каждому из участков, определалась из гистограмм. В результате для выборки за июль вероятности по участкам составили:  $P_{F1} = 0,564$ ;  $P_{F2} = 0,252$ ;  $P_{F3} = 0,184$ .

Соответственно, полная информация о влажности воздуха найдется, как:

$$H(F) = H(F_1) + H(F_2) + H(F_3) \quad (2)$$

$$H(F) = 0,564 \log_2 0,564 + 0,252 \log_2 0,252 + 0,184 \log_2 0,184 = 1,43 \text{ бит.}$$

Диапазон температуры делился на участки от 0 до 35°C с учетом следующих условий. При нулевой температуре дыхание зерна практически равно нулю, при 10°C оно умеренно, при 20°C резко повышается. От того, на каком участке интервала температур находится температура зерна зависит длительность его безопасного хранения [10, 11]. В итоге весь диапазон делился на три участка: 0...10°C; 10...20°C; 20...35°C. Вероятность соответствия температуры конкретным участкам для выборки за июль составили:  $P_{T1} = 0$ ;  $P_{T2} = 0,443$ ;  $P_{T3} = 0,557$ . Полная информация о температуре находится, как:

$$H(T) = 0,443 \log_2 0,443 + 0,557 \log_2 0,557 = 0,99 \text{ бит.}$$

Общая энтропия температуры и влажности не находится простым сложением значений энтропий по температуре и влажности, т.к. они связаны

---

корреляционной зависимостью. Полная энтропия объединенной системы "температура-влажность" в этом случае будет равна сумме энтропии одной из ее составных частей и условной энтропии второй части относительно первой. Условная энтропия равна  $H(T/F) = 0.546$  бит. В итоге полная энтропия объединенной системы "температура-влажность" определится из уравнения:

$$H(F_1T) = H(F) + H(T/F) \quad (4)$$

$$H(F_1T) = 1,43 + 0,546 = 1,976 \text{ бит.}$$

#### 4. Оценка информативности системы

Таким образом, имеются значения максимальных энтропий, которыми обладают две системы "зерновой слой" и "сушильный агент". Активное вентилирование – это процесс взаимодействия данных систем, в конечном итоге приводящий к равновесному их состоянию. Если рассматривать систему "зерновой слой - атмосферный воздух" изолированной от внешних воздействий, то в изолированной системе, как это следует из второго закона термодинамики, равновесное состояние отличается от всех предшествующих неравновесных состояний наибольшим значением энтропии [12].

В случае активного вентилирования, когда параметры атмосферного воздуха соответствуют кондиционной влажности семян, равновесная точка является граничной. При достижении состояния равновесия в системе "сушильный агент - зерно" энтропия системы достигает своего максимального значения, т.е. система обладает максимальной информацией. Из вышеизложенного следует, что энтропия зерна минимальна при достижении зерном равновесной влажности. Отсюда следует, что основная часть информации системы приходится на компонент "сушильный агент" системы.

Согласно теории информации [9], если состояние одной системы (сушильный агент  $A$ ) полностью определяет состояние другой системы

---



(зерновой слой  $B$ ), тогда  $H(B/A) = 0$ , а полная энтропия системы  $H(A, B)$  равна энтропии определяющего компонента. Поэтому

$$H(A, B) = H(A) = H(F, T) = 2 \text{ бит.}$$

При неизменных параметрах воздуха на входе можно в любой момент времени рассчитать параметры температуры и влажности зернового слоя. В этом случае контроль сводится только к измерению входных параметров сушильного агента к поддержанию их на заданном уровне.

В случаях, когда изменения параметров сушильного агента (атмосферного воздуха) носят случайный характер ситуация меняется. Полная энтропия системы  $H(A, B)$  найдется, как:

$$H(A, B) = H(B/A) + H(A),$$

где  $H(B/A)$  - условная энтропия системы  $B$  при изменении системы  $A$ .

В этом случае общая энтропия системы возрастает. Системы контроля постоянно будут ощущать переменный дефицит информации, равный превышению энтропии  $H(B/A)$ .

Примечательно, что энтропия  $H(B/A)$  распределяется в зерновой массе между элементарными зерновыми слоями. Энтропия каждого элементарного слоя определится из выражения:

$$H(L) = [H(B/A) - H(B/A \cdot K/N)] / (N - K), \quad (5)$$

где  $H(L)$  - энтропия элементарного слоя, бит;  $N$  - общее количество элементарных слоев, шт.;  $K$  - количество элементарных слоев находящихся в гигротермическом равновесии с сушильным агентом, шт.

Необходимо оценить какую информацию о зерновом слое (система  $B$ ) несет в себе сушильный агент на ее выходе (система  $C$ ). Полная информация о системе  $B$ , содержащаяся в системе  $C$ , определится из выражения:

$$I_{C \rightarrow B} = H(B) - H(B/C), \quad (6)$$

где  $I_{C \rightarrow B}$  - полная информация о системе  $B$ , содержащаяся в системе  $C$ ;  $H(B/C)$  - условная энтропия изменения системы  $B$  при изменении системы  $C$ .

Но  $H(B) = H(B/A)$ , поэтому

$$I_{C \rightarrow B} = H(B/A) - H(B/C). \quad (7)$$

При контроле выходных параметров сушильного агента неопределенность о состоянии технологического объекта управления снижается на величину  $I_{C \rightarrow B}$ , при этом дефицит информации остается и он равен  $H(B/C)$ . На рис.2. изображен плотный слой семян, включающий три элементарных слоя (система  $B$ ), для наглядности разделенных промежутками, проходя через которые параметры сушильного агента не изменяются.

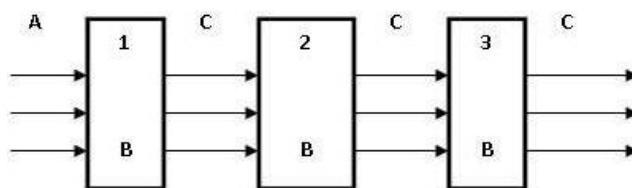


Рис. 2. – Схема прохождения сушильного агента через плотный слой зерна

Из рис.2. видно, что условная энтропия события, когда система  $B$  примет состояние  $B$ , а система  $C$  находится в состоянии  $C$  для предыдущего слоя семян равна нулю, а для последующего слоя отлична, и имеет конкретное значение. Таким образом, полная условная энтропия  $H(B/C)$  для всего плотного слоя будет иметь конкретное значение равное  $\sum_{i=1}^N H_i(B/C)$ .

Значит вплоть до завершения процесса сушки неопределенность обо всем плотном слое, при контроле над ним по выходным параметрам агента сушки, будет оставаться постоянно. Для выходного элементарного слоя  $H(B/C)$  близка или равна 0 и  $I_{C \rightarrow B} = H(A/B)$ . В итоге при контроле параметров

сушильного агента только на выходе из зернового слоя мы будем иметь полную информацию о приграничном выходном слое зерна, чего вполне достаточно, т.к. сушка ведется до высыхания внешних слоев.

Из всего вышеизложенного следует, что, при контроле параметров зернового слоя внутри него, или по параметрам выходящего воздуха полная неопределенность системы от этого не снижается. При этом использование при активном вентилировании атмосферного воздуха со сравнительно низкой относительной влажностью, до 65...70%, и невысокими температурами способствует проведению контроля процесса по косвенным параметрам.

Таким образом, в системах автоматического управления процессом активного вентилирования достаточно использовать средства контроля входных и выходных параметров сушильного агента (температура и влажность). Для снятия неопределённости о тепло– и влагообмене в зерновом слое необходимо использовать математические модели.

## 5. Выводы

Статистическая обработка изменения параметров атмосферного воздуха в течение суток с учётом технологических особенностей процесса активного вентилирования зерна с целью сушки позволила оценить информативность показаний датчиков температуры и влажности зерна.

Статистическая обработка изменения величины влажности зерна, поступающего на зернопункты, позволила оценить информативность показаний влагомеров зерна, при использовании этих данных в процессе активного вентилирования.

С использованием компонентов теории информации показано, что для адекватного контроля процесса сушки зерна активным вентилированием достаточно контролировать параметры воздуха, подающегося в зерновой слой.

## Литература

1. Краус М., Боши Э. Измерительные информационные системы: [пер. с немецкого Е.А Чалого и В.И. Язовцева.]; под ред. Б.Малкова. М.: Мир, 1975. 310 с.
2. Голдовский А.М. Анабиоз и его практическое значение. Л.: Наука, 1986. 169 с.
3. Гуревич И.М. Информационные характеристики сцепленных состояний. // Информационные технологии. № 5. М. 2006. С. 32-39.
4. Е.Н. Целигорова Современные информационные технологии и их использование для исследования систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона, 2010, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222)
5. Васильев А.Н. Статистические характеристики параметров атмосферного воздуха для активного вентилирования семян.: Автоматика и вычислитель. техника в с/х. производстве. Сб. науч. тр. МИИСП им. В.П. Горячкина. М., 1986. С. 77-82.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
7. Васильев А.Н. Электротехнология и управление при интенсификации сушки зерна активным вентилированием. Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2008. 240 с.
8. Колыхан Н.В. Тюрязев В.С. Информационные технологии статистической обработки данных выборок ограниченного объема // Инженерный вестник Дона, 2007, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/21](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/21)
9. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 584 с.
10. Chang C.S.; Converse H.H.; Steele J.L. Modeling of temperature of grain during storage with aeration Trans.ASAE. -St.Joseph(Mich.), 1993; Vol.36, N 2, P. 509519
11. Lamond W.J.; Грэм Р. Отношения между равновесной влажности травосмесей и температуры и влажности воздуха J. CMA. Engg Res., 1993; Vol.56, N 4, P. 327-335
12. Эвери Д. Теория информации и эволюция. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2000. 252 с.

## References

1. Kraus M., Boshi Je. Izmeritel'nye informacionnye sistemy [Measuring information system] :[per. s nemeckogo E.A Chalogo i V.I. Jazovceva.]; pod red. B.Malkova. M.: Mir, 1975. 310 p.
-

2. Goldovskij A.M. Anabioz i ego prakticheskoe znachenie [Anabiosis and its practical value]. L.: Nauka, 1986. 169 p.
3. Gurevich I.M. Информационные характеристики сцепленных состояний [Information characteristics of coupled States]. Informacionnye tehnologii. № 5. M. 2006. pp. 32-39.
4. E.H. Celigorova. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222)
5. Vasil'ev A.N. Statisticheskie harakteristiki parametrov atmosfernogo vozduha dlja aktivnogo ventilirovanija semjan. V kn.: Avtomatika i vychislitel' tehnika v s/h. proizvodstve. Sb. nauch. tr. MIISP im. V.P. Gorjachkina. M., 1986. pp. 77-82.
6. Kobzar' A.I. Prikladnaja matematicheskaja statistika [Applied Mathematical Statistics]. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 sp.
7. Vasil'ev A.N. Jelektrotehnologija i upravlenie pri intensifikacii sushki zerna aktivnym ventilirovaniem [Electrotechnology and management while increasing the drying of grain active ventilation]. Rostov-na-Donu: Terra Print, 2008. 240 p.
8. Kolyhan N.V. Tjurjaev V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2007, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/21](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/21)
9. Gibbs Dzh. V. Termodinamika. Statisticheskaja mehanika [Thermodynamics. Statistical mechanics.]. M.: Nauka, 1982. 584 p.
10. Chang C.S.; Converse H.H.; Steele J.L. Modeling of temperature of grain during storage with aeration Trans.ASAE. -St.Joseph(Mich.), 1993; Vol.36, N 2, P. 509519
11. Lamond W.J.; Grjem R. Otnoshenija mezhduravnovesnoj vlazhnosti travosmesej i temperatury i vlazhnosti vozduha J. SMA. Engg Res., 1993; Vol.56, N 4, pp. 327-335
12. Jeveri D. Teorija informacii i jevoljucija [Information Theory and Evolution.]. M. Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», Institut komp'juternyh issledovanij, 2000. 252 p.