

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ СЕМЯН

Р.С. Старухин

В статье рассматриваются вопросы, связанные с предложенным механизмом водопоглощения зерна и его характеристиками. Представлена математическая модель, описывающая механизм увеличения водопоглощения семян в электрическом поле на основе диффузионной модели.

Ключевые слова: водопоглощение, предпосевная обработка, электрическое поле, математическая модель.

Водопоглощение семян является важным свойством, характеризующим их жизнеспособность. Многими исследователями интенсивность водопоглощения напрямую связывается с посевными качествами семян – с их полевой всхожестью, энергией прорастания, а как следствие, и с урожайностью.

Влага является решающим фактором физиологических и биохимических превращений в зерне на всех этапах его роста и созревания, хранения и переработки. Вода вносит коренные изменения в физико-химические, механические и технологические особенности зерна. Она выступает в роли активатора биохимических процессов в семенах [1].

В настоящее время существуют различные теории о механизме водопоглощения. Часть исследователей считает, что влага в зерно проникает более или менее равномерно по всей его поверхности. Другие утверждают о наличии в зерне непроницаемых для воды участков и локализованных зон, через которые вода проникает в зерно. Третьи приходят к выводу о доступности к прониканию воды всей поверхности зерна, но с дифференцированной количественной характеристикой по ее отдельным частям.

К сторонникам первой точки зрения относятся Райман. Согласно данной гипотезе, зерно покрыто водопроницаемой оболочкой, через которую оно беспрепятственно впитывает воду, т. е. вода проникает внутрь зерна через всю его поверхность. Исключение составляет борода. Затрудненное проникание воды через оболочку объясняется тем, что воздушный слой в волосках борода препятствует прохождению воды. Другое объяснение сводится к тому, что повышенное трение между водой и поверхностью волосков затрудняет впитывание ее зерном. Согласно Райману, вода при температуре 40 °С через 1 ч про-

питывает все зерно и равномерно в нем распределяется.

Фресер и Хелей пришли к выводам о том, что при замачивании вода проникает в оболочку зерна и быстро распространяется по всему эндосперму. На количество и скорость поглощения воды зерном пшеницы оказывают влияние сорт, продолжительность отволаживания зерна, температура и размеры зерен. Мелкие зерна поглощают воды больше, чем крупные. Так, при исходной влажности 10,2–10,3 % мелкие зерна через 30 мин замачивания поглощали 1,71 %, а крупные – 1,51 % влаги [2].

Нуре установил, что поглощение влаги у крупных зерен происходит в 2–3 раза медленнее, чем у мелких в связи с резким различием удельной поверхности.

Опыты, проведенные Казаковым, показали, что составные части ржаного зерна по степени водонепроницаемости и водопоглотительной способности могут быть размещены так: плодовая и семенная оболочки, эндосперм и алейроновый слой, зародыш. Количество влаги, проникающее в зерна через зародыш, значительно превышает количество влаги, поступающее через всю остальную поверхность зерна.

Существует две точки зрения относительно механизма поглощения зерном воды. Часть авторов утверждает, что поглощение подчиняется закону диффузии. Другие говорят о ступенчатом характере поглощения воды тканями зерна.

Беккер занимался изучением изменения влажности зерна от 7,1 до 50 % (к массе сухого вещества) при замачивании его в воде в диапазоне температур от 0 до 70 °С. Он обнаружил, что поглощение влаги происходит в два этапа. В начальный период происходит резкое возрастание влажности, затем вода медленно проникает внутрь эндосперма. За-

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ СЕМЯН

зависимость начального прироста влажности от температуры подчиняется уравнению (в кг/кг):

$$\Delta m_i = 0,05300 - 0,00046\tau \quad (1)$$

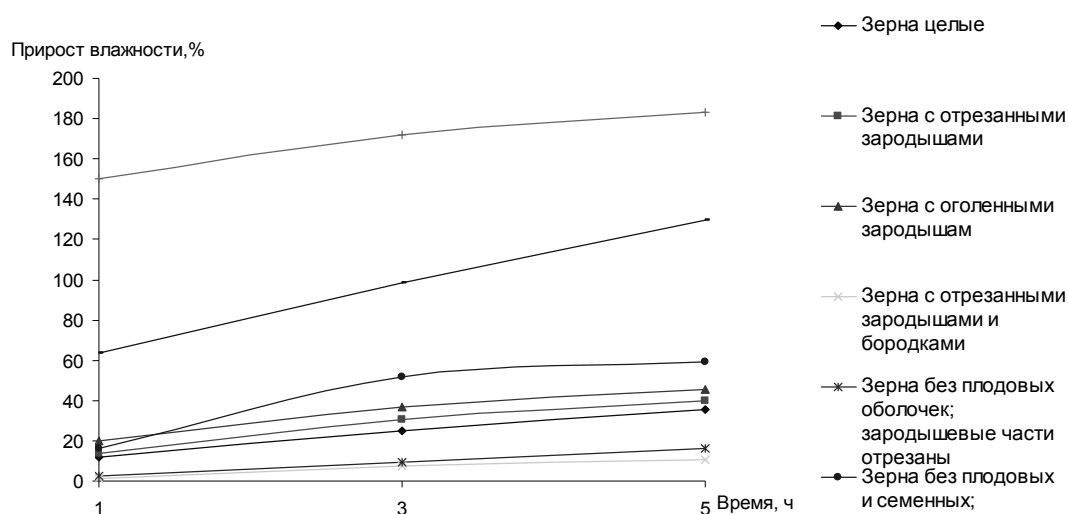


Рисунок 1 – Прирост влажности при погружении зерен в воду при температуре 25 °C в пересчете на массу сухого вещества

В диапазоне влажности 0,10-0,25 кг/кг Δm_i практически не изменяется. Второй этап подчиняется уравнению диффузии:

$$1 - \bar{M} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{S}{V} \cdot \sqrt{D \cdot \tau} \quad (2)$$

где $(1 - \bar{M})$ – прирост влажности в кг/кг; S – площадь поверхности зерновки в m^2 ; V – объем зерновки в m^3 ; D – коэффициент диффузии, m^2/c ; τ – продолжительность абсорбции, с.

Среднее значение D определялось уравнением Аррениуса. Коэффициент диффузии в большом интервале влагосодержания не зависит от влажности зерна. На первом этапе поглощения влаги он составил $D=24 \cdot 10^{-3}$ – $3,1 \cdot 10^{-3} m^2/c$; на втором – $18 \cdot 10^{-3} m^2/c$. При постоянном D приращение влаги находится в прямой зависимости от $\tau^{1/2}$, где τ – продолжительность пребывания зерновки в воде.

Беккер и Саланс исследовали механизм сорбции и диффузии влаги в зерне пшеницы, исходя из того, что коэффициент диффузии связан с изотермой десорбции. Они пришли к выводу, что при низких значениях влажности (меньше 11,0–13,3 %) молекулы воды тяготеют к особым сорбционным центрам, и диффузия представляет собой миграцию активированных молекул между этими центрами. В данном случае применим механизм диффузионного течения, характеризующийся двумя измерениями.

Согласно общей теории переноса тепла и вещества в капиллярнопористых коллоидных средах, разработанной Лыковым и др., энергия связи влаги и материала является термодинамическим потенциалом переноса влаги во влажных материалах ($\Theta_i = E$).

Основной закон переноса влаги выражается как:

$$i = -K \nabla \Theta_m \quad (3)$$

где i – плотность потока влаги, т. е. количество влаги ΔG , переносимое в единицу времени через единицу поверхности одинакового по-

тенциала ΔS : $i = \frac{dG}{d\tau \Delta S}$, кг/ m^2 ч; $\nabla \Theta_m$ – градиент потенциала переноса вещества, измеряемый в ед. потенциала; K – коэффициент пропорциональности или коэффициент массопроводимости в кг/м ч ед. потенциала.

Потенциал переноса массы вещества зависит от условий термомеханического сопряжения тела с окружающей средой и равен производной, соответствующей характеристической функции по массе вещества:

$$\mu = \frac{\partial \psi}{\partial v} \quad (4)$$

где μ – соответственно выбранный химический элемент; v – масса вещества в молях.

Уточнить математическое выражение основного закона переноса влаги применительно к живой биологической системе можно выделением из коэффициента пропорциональности K той его части, которая определяется биологической активностью системы.

Если через $K=K_1$ обозначить коэффициент пропорциональности в кг/м ч ед. потенциала в зерне, сохраняющем все свойства живой биологической системы, а через K_2 – тот же коэффициент, но в зерне, лишенном этих свойств, то биологический коэффициент K_6 будет равен:

$$K_6 = \frac{K_1}{K_2}. \quad (5)$$

Можно ожидать, что K_2 меньше подвержен колебаниям вследствие практически мало различающегося химического состава зерна одной культуры, в то время как K_6 ввиду большой разницы биологической активности зерна даже в одной партии должен иметь более широкие границы изменения.

Поскольку $K_1=K=K_2K_6$ основной закон переноса влаги в зерне, т. е. в объекте биологической природы, можно изобразить в следующем виде [2]:

$$i = -K_2 \cdot K_6 \nabla \Theta. \quad (6)$$

Известно, что предпосевная обработка семян различными физическими факторами оказывает стимулирующее действие и способно увеличивать всхожесть, энергию прорастания и урожайность культур [1].

Установлено, что электромагнитное поле влияет на скорость и величину водопоглощения семян [3, 5]. Предполагается, что на начальном этапе поглощения семенами воды, когда семя находится в состоянии покоя и биологические механизмы набухания еще не запущены, процесс поглощения можно рассматривать как физический процесс диффузии жидкости через оболочку семени.

Этот этап чрезвычайно важен, поскольку в это время создаются предпосылки для выхода семян из состояния покоя, формируются условия для получения дружных всходов, повышения энергии прорастания.

Рассмотрим подробно процессы, протекающие в зерне, при внесении его в электрическое поле.

Поскольку форма зерновых частиц близка к трехосному эллипсоиду, то задача о поляризации диэлектрического эллипсоида может быть решена в эллипсоидальной системе координат, на основе уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме.

Изменения объема диэлектрика определяется в по выражению [6]:

$$\frac{V-V_0}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \left[\frac{\varepsilon-1}{(n\varepsilon+1-n)K} - \frac{1}{(n\varepsilon+1-n)^2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P} \right)_T \right], \quad (7)$$

где V_0 – начальный объем диэлектрика; V – объем диэлектрика при внесении его в элек-

трическое поле; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

$\frac{1}{K} = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$ – коэффициент сжимаемости тела; E – напряженность электрического поля; n – коэффициент деполяризации; $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P} \right)_T$ – коэффициент, характеризующий

изменение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика при изменении давления P , при постоянной температуре T .

Если рассматривать водопоглощение как диффузионный процесс, происходящий через оболочку семени по первому закону Фика, то тогда поток молекул воды через оболочку толщиной ΔZ определяется по формуле

$$j = -D \frac{\Delta P}{\Delta Z}, \quad (8)$$

где j – масса воды, прошедшая через площадь $\Delta S = 1 \text{ м}^2$ за время $\Delta t = 1 \text{ с}$; $\frac{\Delta P}{\Delta Z}$ – гра-

диент плотности (ΔP) молекул на расстоянии ΔZ , равному толщине оболочки семени; D – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии определяется по формуле

$$D = \alpha \frac{m^2}{\tau_0} e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (9)$$

где α – коэффициент, зависящий от структуры твердого тела; τ_0 – постоянная, по порядку величины равная периоду собственных колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, с; m – межатомное расстояние, м; A – энергия активации диффузии, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

Изменение размеров осей эллипсоида должно удовлетворять условию

$$\frac{a}{a_0} = \frac{b}{b_0} = \frac{c}{c_0} = z, \quad (10)$$

где a, b, c – величины полуосей эллипсоида, помещенного в поле; a_0, b_0, c_0 – величины полуосей эллипсоида без поля.

Абсолютная деформация растяжения семени вдоль одной из осей будет равна

$$X = a - a_0 = za_0 - a_0 = a_0(z - 1). \quad (11)$$

При растяжении семени под действием электрического поля увеличивается не только абсолютная деформация X , но и межатомное расстояние m :

$$X = (m - m_0)N_x, \quad (12)$$

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ СЕМЯН

где $\Delta m = m - m_0$ – изменение межатомных расстояний при деформации; $N_x = \frac{a_0}{m_0}$ – число атомных слоев вдоль оси x . Отсюда

$$m = m_0 \left(\frac{X}{a_0} + 1 \right). \quad (13)$$

Подставив (11) в (13), получим:

$$m = m_0 \left(\frac{a_0(z-1)}{a_0} + 1 \right) = m_0 z. \quad (14)$$

При увеличении объема семени толщина его оболочки будет уменьшаться от ΔZ_0 до ΔZ . Определим изменение толщины оболочки.

Исходя из предположения о том, что оболочка претерпевает упругую деформацию можно записать приближенно

$$S \Delta Z = S_0 \Delta Z_0, \quad (15)$$

где S и S_0 – площадь поверхности эллипсоида.

Площадь эллипсоида определим по приближенной формуле К. Томсена [7]:

$$S(a, b, c, p) = 4\pi \left(\frac{a^p \cdot b^p + a^p \cdot c^p + c^p \cdot b^p}{3} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (16)$$

где p – параметр, при $p = 1,6075$ максимальная относительная погрешность составит 1,061 %.

Выражение (15) с учетом выражений (10) и (16)

$$\frac{S}{S_0} = \frac{\Delta Z_0}{\Delta Z} = z^2. \quad (17)$$

Отсюда можно выразить толщину покрова семени

$$\Delta Z = \frac{\Delta Z_0}{z^2}. \quad (18)$$

На основании полученных выражений для межатомных расстояний (14) и толщины покрова семян (18) запишем формулу для водопоглощения:

$$J = -\alpha \frac{m^2}{\tau_0} e^{-\frac{A}{kT}} \frac{\Delta P}{\Delta Z} = -\alpha \frac{m_0^2 z^2}{\tau_0} e^{-\frac{A}{kT}} \frac{\Delta P}{\Delta Z_0} z^2. \quad (19)$$

Относительное водопоглощение:

$$I = \frac{J}{J_0} = z^4, \quad (20)$$

где $J_0 = -\alpha \frac{m^2}{\tau_0} e^{-\frac{A}{kT}} \frac{\Delta P}{\Delta Z_0}$ – водопоглощение без воздействия электрического поля.

Объем трехосного эллипсоида вычисляется как $V = \frac{4}{3} \pi abc$, с учетом выражения (10):

$$V = V_0 z^3. \quad (21)$$

Подставив (22) в (7) получим

$$1 - \frac{1}{z^3} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \left[\frac{\varepsilon - 1}{(n\varepsilon + 1 - n)K} - \frac{1}{(n\varepsilon + 1 - n)^2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P} \right)_T \right], \quad (22)$$

выразив из (15) z и подставив его в (13) получим связь величины относительного водопоглощения и напряженности электрического поля:

$$I = \left\{ 1 - \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \left[\frac{\varepsilon - 1}{(n\varepsilon + 1 - n)K} - \frac{1}{(n\varepsilon + 1 - n)^2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P} \right)_T \right] \right\}^{\frac{4}{3}}. \quad (23)$$

Полученная зависимость указывает на влияние величины напряженности электрического поля на водопоглощение зерна. Таким образом, необходимо достаточно точное определение напряженности поля, а поскольку воздействие оказывается обычно на слой семян, то и напряженность поля необходимо определять в слое диэлектрика.

При рассмотрении электрического поля в промежутке между электродами, используемыми для создания электрического поля с целью предпосевной обработки семян, систему, включающую воздушный промежуток, зерновой слой и транспортерную ленту можно рассматривать как плоский конденсатор с диэлектриком, состоящим из нескольких соприкасающихся плоскопараллельных диэлектрических слоев.

Различные слои такого конденсатора будут отличаться значениями диэлектрической проницаемости.

Если обозначить через y_1 и y_2 доли объемного содержания первого и второго компонента для двухслойного диэлектрика будем иметь:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{y_1 \varepsilon_1 + y_2 \varepsilon_2}. \quad (24)$$

Для более общего случая диэлектрика, состоящего из m компонентов:

$$\frac{1}{\varepsilon^*} = \sum_{i=1}^m \frac{y_i}{\varepsilon_i}. \quad (25)$$

При выборе режима работы установки для предпосевной обработки возникает необходимость определения напряженности электрического поля в том слое, который несет объект обработки, т. е. воздушно-зерновую смесь. Однако возникает ряд трудностей в связи с необходимостью определения ди-

электрической проницаемости зерновой смеси.

Для расчета диэлектрической проницаемости зерновой смеси широко используется формула Лихтенеккера. Эта формула, носящая название логарифмического закона смещения, для смеси m компонентов имеет вид:

$$\lg \varepsilon^* = \sum_{i=1}^m y_i \lg \varepsilon_i. \quad (26)$$

Для определения диэлектрической проницаемости воздушно-зерновой смеси более справедлива зависимость, предложенная В. И. Оделевским для двухфазной статистической смеси при условии, что ε одной компоненты X намного больше ε другой компоненты Y , т. е. $\varepsilon_x > \varepsilon_y$ (зерно и воздух удовлетворяют этому условию)

$$\varepsilon_{сл} = A + \sqrt{A^2 + \frac{\varepsilon_3 \cdot \varepsilon_6}{2}}, \quad (27)$$

где ε_3 , ε_6 – диэлектрические проницаемости зерна и воздуха соответственно; A – константа, определяемая выражением

$$A = \frac{1}{4} [(3Z_1 - 1)\varepsilon_1 + (3Z_2 - 1)\varepsilon_2], \quad (28)$$

где, в свою очередь, Z_1 , Z_2 – удельный объем массы зерен и воздуха.

Распределение поля в двухслойном конденсаторе с проводимостью при переменном напряжении существенно отличается от распределения поля при постоянном напряжении. Основная причина этого различия состоит в том, что при переменном напряжении емкостной ток, или ток смещения, существует не только при включении напряжения, но и в установившемся режиме.

Выражения для напряженности электрического поля в слоях диэлектрика для установившегося режима [8]:

$$\begin{cases} E_{1ycm} = \frac{U \bar{\gamma}_2}{\bar{\gamma}_1 d_2 + \bar{\gamma}_2 d_1}, \\ E_{2ycm} = \frac{U \bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_1 d_2 + \bar{\gamma}_2 d_1}, \end{cases} \quad (29)$$

и отсюда

$$\frac{E_{2ycm}}{E_{1ycm}} = \frac{\bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_2}. \quad (30)$$

Амплитуды напряженностей поля обратно пропорциональны модулям полных проводимостей:

$$\frac{E_{1m ycm}}{E_{2m ycm}} = \frac{\sqrt{\gamma_2^2 + \frac{\varepsilon_2^2 \omega^2}{k^2}}}{\sqrt{\gamma_1^2 + \frac{\varepsilon_1^2 \omega^2}{k^2}}} = \frac{\varepsilon_2 \sqrt{1 + tg^2 \delta_2}}{\varepsilon_1 \sqrt{1 + tg^2 \delta_1}}. \quad (31)$$

Если емкостная проводимость значительно больше омической проводимости, что характерно при частотах, близких к промышленным и больших, то в выражении можно пренебречь значениями омической проводимости.

Тогда

$$\frac{E_{2m ycm}}{E_{1m ycm}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (32)$$

и соответственно

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1ycm} &= \frac{U_m e^{j\omega t} \varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}, \\ \dot{E}_{2ycm} &= \frac{U_m e^{j\omega t} \varepsilon_1}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}. \end{aligned}$$

Итак, на основе приведенных выражений можно определить напряженность электрического поля в слое семян.

Таким образом, предложен механизм водопоглощения семян на начальной стадии набухания, получена математическая модель изменения водопоглощения семян в электрическом поле, основанная на диффузионной модели водопоглощения, и позволяющая определить наилучшие параметры обработки семян в электрическом поле с точки зрения водопоглощения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеев, В.Ю. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы физическими полями [Текст] / В.Ю. Асеев, В.И. Левин // Сб. научных трудов по агрономии, посвященный 150-летию со дня рождения П.А. Костычева. – Рязань, 1996.
2. Гинзбург, А.С. Влага в зерне [Текст] / А.С. Гинзбург, В.П. Дубровский, Е.Д. Казаков, Г.С. Окунь, В.А. Резчиков. – М.: Колос, 1969. – 224 с.
3. Жидченко, Т.В. Механизм увеличения водопоглощения семян под воздействием магнитного и электрического полей [Текст] / Т.В. Жидченко, Ю.Н. Ксёэнз, В.Н. Полунин, И.Г. Сидорцов, К.Х. Попандопуло, О.В. Сидорцова // Электротехнологии и электрооборудование в с.-х. пр-ве. – Азов; Черномор. гос. агроинж. акад. – 2002. – Вып. 1. – С. 44–47.
4. Жолкевич, В.Н. Водный обмен растений [Текст] / В.Н. Жолкевич, Н.А. Гусев, А.В. Капля [и др.]. – М.: Наука, 1989. – 256 с.
5. Ксёэнз, Н.В. К механизму влияния энергии магнитного и электрического полей на скорость водопоглощения семян с. х. культур [Текст] / Н.В. Ксёэнз, Н.С. Гукова // Электротехнологии и электрообору-

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ СЕМЯН

дование в с.-х. пр-ве. — Азов; Черномор. гос. агроинж. акад. — 2002. — Вып. 1. — С. 28–30.

6. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст]: учеб. пособие для ВУЗов; в 10 т. — Т. 8. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Наука, 1982. — 624 с.

7. Миронов, Н.А. Процессы переноса в телах эллипсоидальной конфигурации / Н.А. Миронов, А.А. Сергеева, В.С. Косачев, Е.П. Кошевой // Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]: электрон. науч. журн. / Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. — Электрон, журн. — СПб.: СПбГУНИПТ, 2006-2010. — Ре-

жим доступа: <http://processes.open-mechanics.com>. — Загл. с экрана.

8. Сканиви, Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей) [Текст] / Г.И. Сканиви. — М.: Гостехиздат, 1949. — 500 с.

9. Fraser, C. W. Factors that influence the rate of absorption of water by wheat [Text] / C.W. Fraser, W.L. Haley //Cereal Chemistry — 1932. — N9. — p. 45–49.

Старухин Р.С., аспирант, каф. «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. 8 (3852) 29-07-76, E-mail: roman_staruhin@mail.ru