

8. [Atthajariyakul S. and Leephakpreeda, Fluidized bed paddy drying in optimal conditions via adaptive fuzzy logic control // Journal of food engineering. – 2006. – Vol. 75\(1\). – P. 104–114.](#)
9. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
10. Інструкція по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок. Г.М. Станкевич, О.І. Шаповаленко, Т.В. Страхова, Б.М. Петруня, А.І. Яковенко, М.В. Остапчук, А.Б. Шашкін. – Одеса–Київ: ДАК «Хліб України». – 1997. – 72 с.

УДК 536.46+534.222.2+664.7

## ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СИЛОСА

Волков В.Э., д-р техн. наук, доцент

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*Создана программа оценки взрывоопасности силоса. Произведенные расчеты демонстрируют, что железобетонные силосы более взрывобезопасны в сравнении с металлическими.*

*Program for estimate of explosion hazard for silo is created. Calculations demonstrate that ferro-concrete silo is more explosive-safe than the metal one.*

Ключевые слова: взрыв, взрывоопасность, пылевоздушная смесь, силос, программа.

Проблема взрывобезопасности силосов представляется актуальной, так как согласно данным [1,2] распределение взрывов пылевоздушной смеси (ПВС) на предприятиях по хранению и переработке зерна по месту возникновения таково, что на силосы и бункера приходится почти половина от общего числа взрывов (Таблица 1), т.е. именно силосы и бункера представляют собой наиболее взрывоопасные элементы в системе зерновых и комбикормовых производств. При загрузке и гравитационной разгрузке силосов в их свободных объемах образуется ПВС, способная воспламениться и гореть [1]. На стенках бункеров и силосов может оседать и накапливаться в значительных количествах мелкодисперсная сухая пыль, которая при внешних возмущениях быстро переходит во взвешенное состояние, также создавая взрывоопасную ПВС [1]. Взрыв в силосе приводит к тяжелым последствиям, так как при этом часто разрушаются боковые стенки и перекрытия, деформируется и разрывается выпускной конус под действием давления взрыва [2]. Кроме того, при взрыве в силосе возможен выброс горячей смеси и продуктов взрывного горения в над- и подсилосный этажи [2].

**Таблица 1 – Распределение взрывов ПВС на зерновых предприятиях по месту возникновения [2]**

Место возникновения взрыва	Количество взрывов в % от общего числа
Силосы и бункера	47,7
Нории и конвейеры	21,0
Аспирационные системы, пневмотранспорт	6,7
Дробилки, вальцовые станки	4,1
Зерносушилки	6,1
Производственные и другие помещения	4
Место не установлено	10

Под силосом понимается вертикальная цилиндрическая или призматическая емкость, предназначенная для хранения сыпучего материала. При этом высота от верха воронки или набетонки (забутки) до низа надсилосного перекрытия должна быть, как правило, более  $1,5\sqrt{A}$  (где  $A$  – площадь горизонтального сечения силоса) [3].

Силосы можно разделить на [3]:

- отдельно стоящие;
- входящие в состав силосных корпусов.

Нет никаких различий при оценке взрывоопасности отдельно стоящего силоса и такого же (отдельно взятого) силоса в составе силосного корпуса, хотя вероятность взрыва в последнем все же выше, так как взрыв в нем может произойти не по внутренним причинам, а как следствие взрыва в соседнем силосе, т.е. по причинам внешнего характера.

По характеру материала, из которого изготовлены силосы их можно разделить на [3]:

- железобетонные;
- металлические.

Железобетонные силосы могут быть монолитными и сборными [3].

В большинстве случаев железобетонные силосы возводятся на подсилосной плите, которая, в свою очередь, устраивается на колоннах, устанавливаемых на фундаментальной плите (при этом пространство между фундаментальной и подсилосной плитами образует так называемый подсилосный этаж, где располагаются подсилосные конвейеры для разгрузки зерна из силосов с передачей его в башмаки основных норий).

Монолитные силосы могут возводиться непосредственно на фундаментальной плите. В этом случае в нижней части силоса устраиваются проемы для окон, дверей, проходов и установки подсилосных конвейеров.

Железобетонные силосы в поперечном сечении, вообще говоря, могут иметь самую разнообразную форму, а именно [3]:

- круглую;
- прямоугольную (в частности – квадратную);
- ромбовидную;
- многоугольную (треугольную, пятиугольную, шестиугольную, восьмиугольную);
- звездообразную.

Иногда применяются железобетонные силосы с более сложными видами поперечного геометрического сечения.

Преобладают, однако, силосы круглого и прямоугольного (или квадратного) сечения [3]. Наиболее распространенными в России и в Украине являются круглые силосы диаметром 6м и квадратные с размерами в плане 3×3 м [3]. По этой причине созданное программное приложение производит оценку взрывоопасности силосов с круглым или прямоугольным (в частности – квадратным) поперечным сечением. При этом нужно отметить, что взрывоопасность восьми-, шести- и пятиугольных силосов можно в принципе оценивать показателями взрывоопасности круглых силосов соответствующего диаметра (этот диаметр должен быть равен диаметру окружности, описанной около многоугольника в сечении рассматриваемого силоса), однако при прочих равных условиях взрывоопасность многоугольных силосов несколько выше, чем круглых.

Металлические силосы изготавливают из стали (обычно оцинкованной, иногда нержавеющей) или из алюминиевых сплавов. В качестве основной принята круглая (цилиндрическая) форма металлических силосов [3]. Металлические силосы, как правило, имеют большие размеры и возводятся методами рулонирования или навивки [3].

Таким образом, каждый силос можно моделировать как круглую цилиндрическую трубу или как канал прямоугольного (в частном случае – квадратного) сечения.

Высота силоса (железобетонного или металлического) как правило значительно превышает его поперечный размер: типовая высота железобетонных силосов составляет 30 м, а на скальных основаниях она может быть увеличена до 40 м [3]; оптимальной высотой металлических силосов в большинстве случаев является 15–20 м. По этой причине силос квадратного или прямоугольного сечения можно рассматривать как потенциально взрывоопасный объект вида 2.а, а силос круглого сечения – как потенциально взрывоопасный объект вида 3.а [4–6]. Эти силосы можно промоделировать также как потенциально взрывоопасные объекты вида 2.в и 3.в [4–6], что несколько усложняет расчеты, но приводит к практически тем же выводам, что и расчеты на базе указанного выше моделирования.

Разработана информационная модель силоса как потенциально взрывоопасного объекта [4,5].

Для оценки взрывоопасности отдельно взятого силоса в среде программирования Visual Basic разработана вычислительная программа «Оценка взрывоопасности отдельных силосов» («SilosOtdelny») (см. Рис. 1). Пользователь имеет возможность выбрать один из стандартных железобетонных силосов или же самостоятельно задать форму и размеры силоса (железобетонного или металлического).

Дальнейшие расчеты требуют задания вида ПВС (зернового продукта), концентрации пыли, влажности, температуры и дисперсности (среднего размера пылевых частиц) (см. Рис. 2). Все эти величины могут измеряться при помощи стандартных метрологических приборов в режиме эксплуатации зернохранилища или зерноперерабатывающего предприятия (а программа «Оценка взрывоопасности отдельных силосов» в этом случае является составной частью программного обеспечения соответствующей автоматизированной системы управления). Эти данные позволяют дать оценку температуры воспламенения и нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ) ПВС как результат аппроксимации известных эмпирических данных [1,2,7–10].

Результат оценки возможности возгорания и возникновения пожара представляется на экране монитора таким образом, как показано на Рис. 3

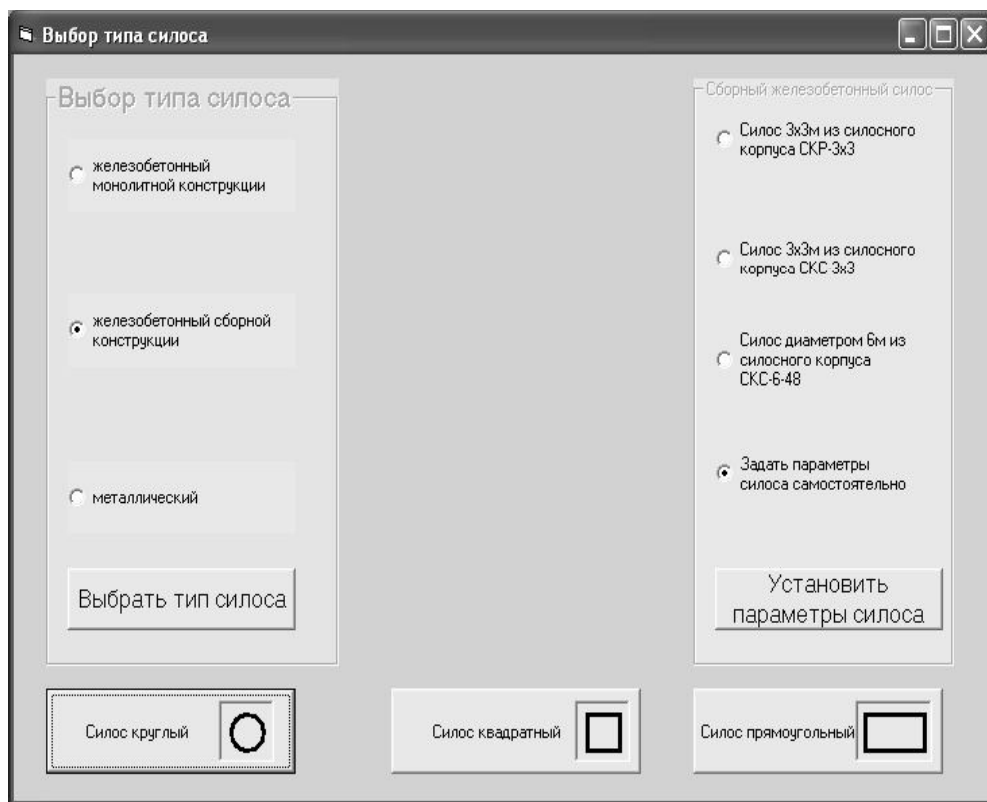


Рис. 1 – Форма программы SilosOtdelnyy.exe (проект SilosOtdelnyy.vbp в программном комплексе «Оценка взрывоопасности отдельных силосов») для задания формы и размеров силоса

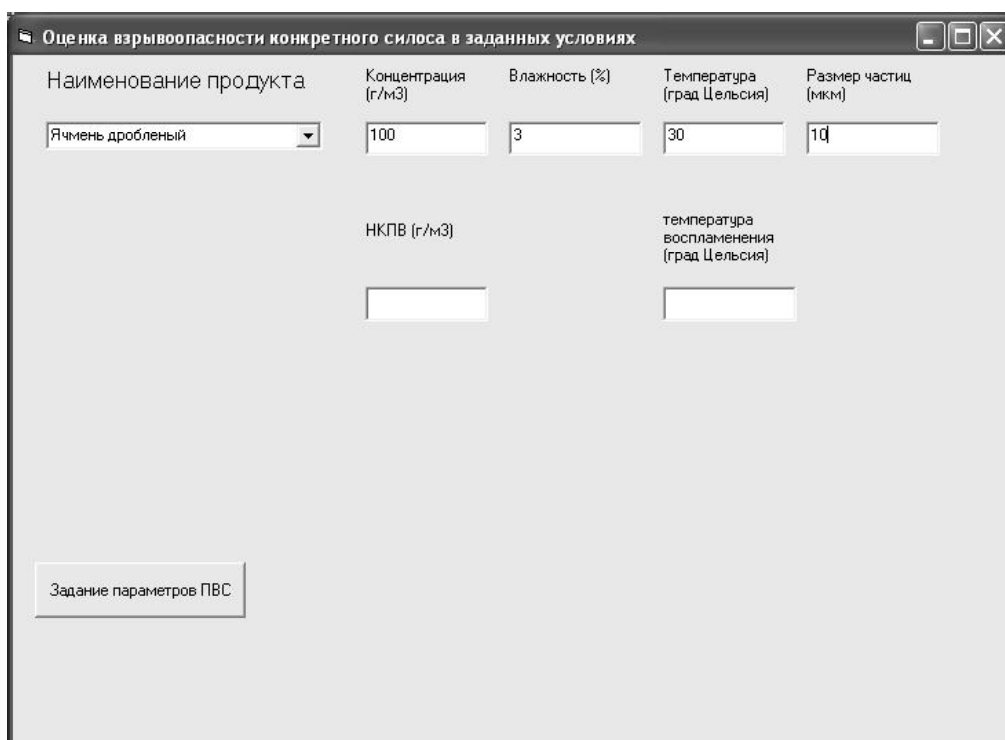


Рис. 2 – Форма программы SilosOtdelnyy.exe для задания параметров ПВС

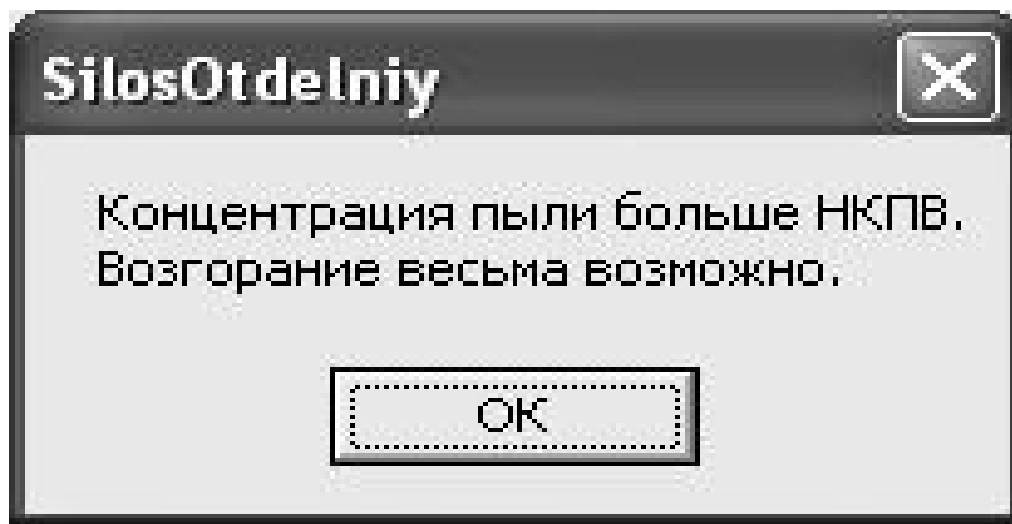
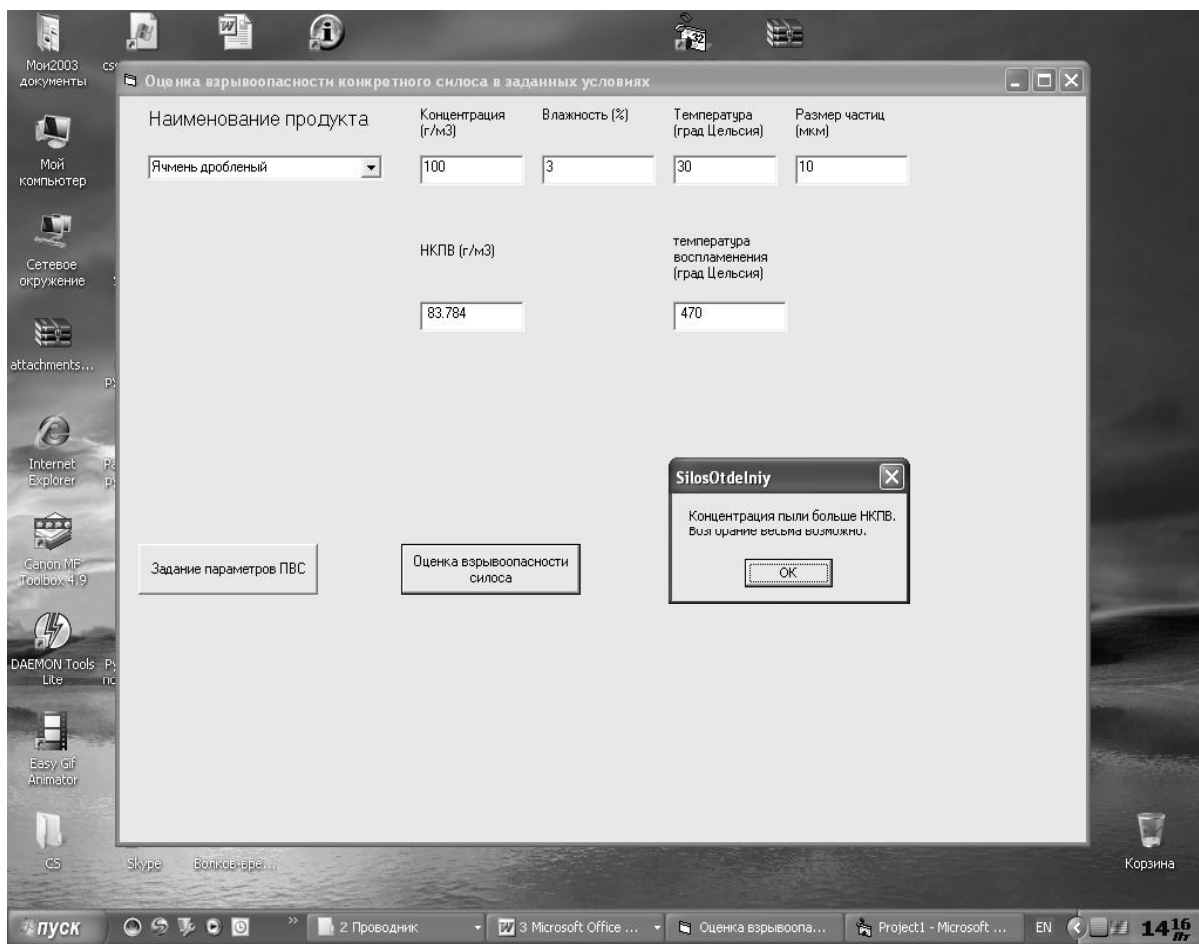


Рис. 3 – Сообщение о степени пожароопасности силоса на экране монитора

Оценка возможности перехода пожара во взрыв (который для ПВС в силосах всегда носит дефлаграционный характер), длины преддетонационного участка и времени перехода пожара во взрыв производится по методике [11–14] с применением оценки ширины зоны пламени для газовзвесей [15]. Для монолитных железобетонных силосов [3] расчетная длина преддетонационного участка уменьшена в программе в 2 раза, как с целью повышения надежности оценки взрывоопасности, так и по причине возможности наличия отдельных шероховатостей на стенках силоса. Для сборных железобетонных силосов [3] расчетная длина преддетонационного участка уменьшена в программе в 20 раз, так как стены таких си-

ловос, собранные из ребристых или даже гладких объемных элементов [3], или из напряженных криволинейных элементов с разрезкой кольца на 3 или 4 части [3] (если силосы имеют круглое сечение), имеют периодические шероховатости на стенах. Для металлических силосов, изготовленных методом рулонирования или навивки, длина преддетонационного участка уменьшена в программе в 50 раз, так как такие силосы напоминают спираль Щелкина [16]. Все указанные выше оценки длины преддетонационного участка являются приблизительными (особенно для сборных железобетонных и металлических силосов), поэтому и приведенные ниже оценки взрывоопасности силоса носят нечеткий характер

Сообщения о длине преддетонационного участка и времени возможного перехода горения во взрыв поступают на экран монитора (Рис. 4) и являются необходимой информацией для принятия обоснованного решения по обеспечению взрывобезопасности и/или взрывозащиты. Расчеты показывают, что время развития взрыва в органических ПВС в сотни и тысячи раз превосходит время развития взрыва в горючих газовых смесях.

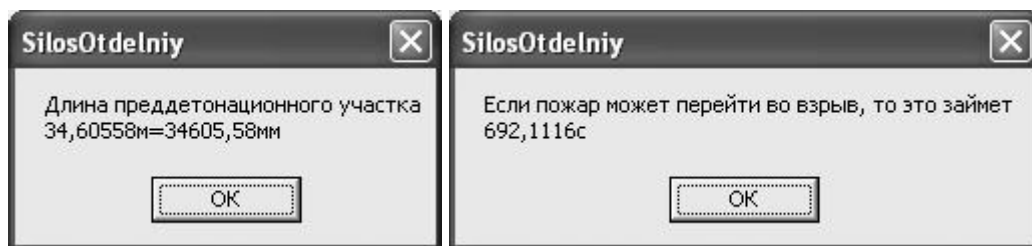
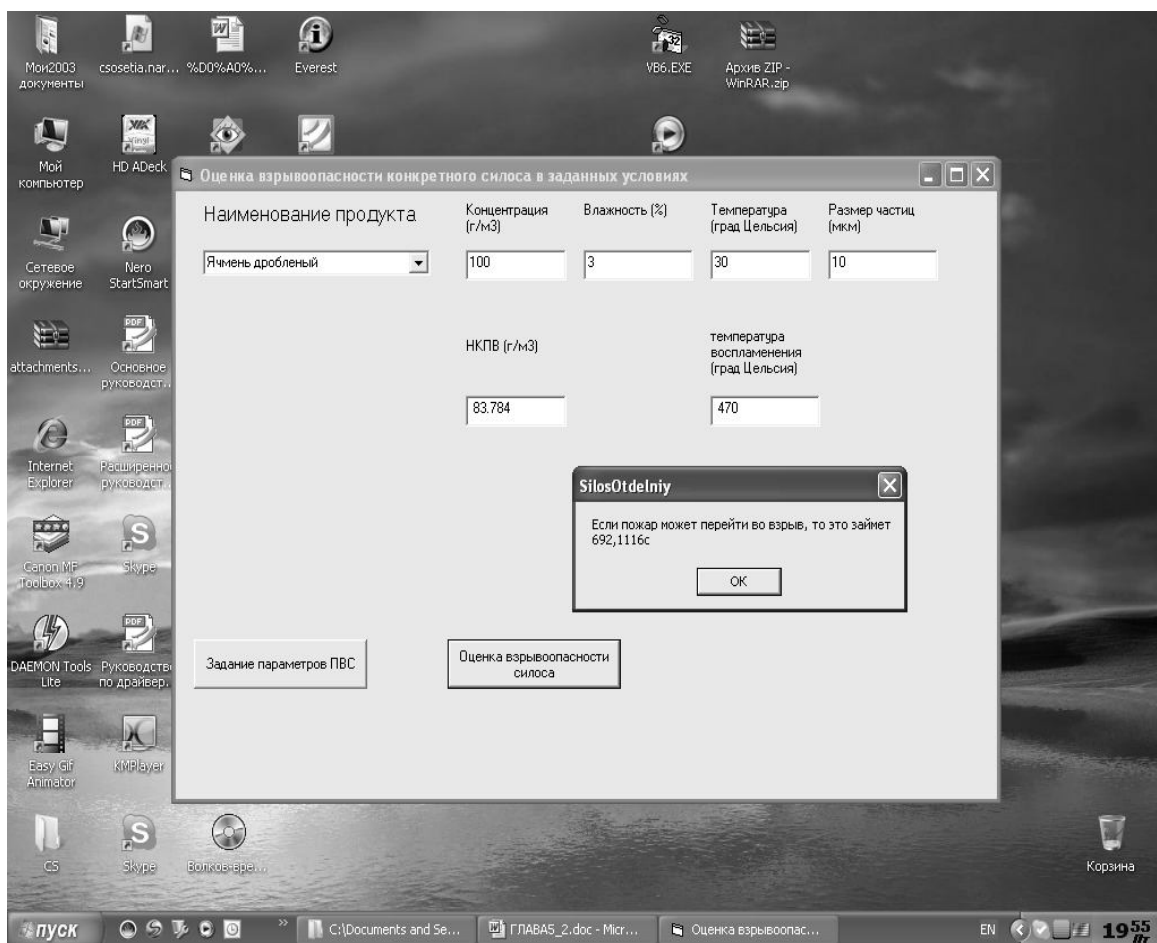


Рис. 4 – Сообщения о длине преддетонационного участка и времени перехода горения во взрыв  
Вид сообщения с нечеткой оценкой взрывоопасности силоса [17] приведен на Рис. 5.

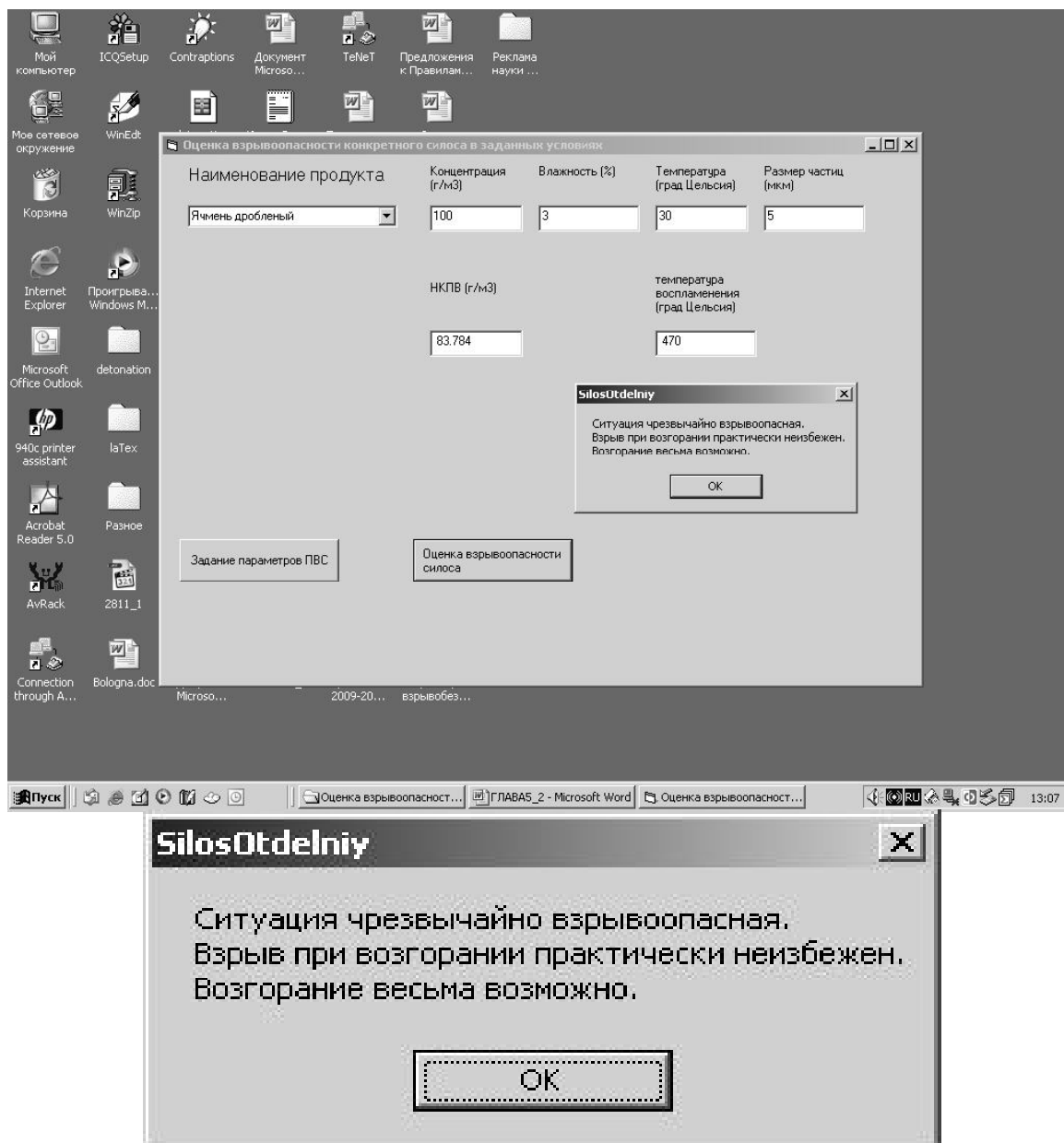


Рис. 5 – Сообщение о степени взрывоопасности силоса

Результаты произведенных расчетов можно обобщить в следующих выводах:

Результаты произведенных расчетов можно обобщить в следующих выводах (некоторые из которых сами по себе достаточно очевидны):

1. С ростом влажности существенно понижается как пожароопасность, так и взрывоопасность ПВС в силосе.
2. Температурные колебания в пределах нескольких десятков градусов слабо влияют на пожароопасность и взрывоопасность ПВС в силосе.
3. С уменьшением среднего размера пылевых частиц в ПВС взрывоопасность ПВС в силосе возрастает. Мелкодисперсная пыль существенно более взрывоопасна, чем крупнодисперсная.
4. Монолитные железобетонные силосы заметно менее взрывоопасны, чем сборные железобетонные силосы. Металлические силосы гораздо более взрывоопасны по сравнению с железобетонными.
5. Увеличение высоты силоса повышает его взрывоопасность.

6. Низкая степень пожароопасности силоса не всегда соответствует низкой степени его взрывоопасности, если понимать под взрывоопасностью возможность перехода горения во взрыв. Т.е. собственно взрывоопасность объекта (в данном случае – силоса) может быть высокой при его низкой пожароопасности. Этот факт кажется парадоксальным только на первый взгляд, так как механизмы возгорания горю-

чих сред (в данном случае – ПВС) и механизмы перехода в этих средах «медленного» горения во взрыв совершенно различны и практически не связаны между собой.

Оценка взрывоопасности отдельно взятого силоса как элементарного потенциально взрывоопасного объекта служит основой для оценки силосного корпуса как сложного потенциально взрывоопасного объекта.

Программа «Оценка взрывоопасности отдельных силосов» (проект SilosOtdelnyi.vbp, выполняемый модуль SilosOtdelnyi.exe) позволяет принимать решения по проектированию и реконструкции силосов и силосных корпусов с целью повышения уровня их взрывобезопасности.

#### Литература

1. Васильев Я.Я. Взрывобезопасность на предприятиях по хранению и переработке зерна / Я.Я. Васильев, Л.И. Семенов – М.: Колос.– 1983. – 224 с.
2. Семенов Л.И. Взрывобезопасность элеваторов, мукомольных и комбикормовых заводов / Л.И. Семенов, Л.А. Теслер – М.: Агропромиздат. – 1991. – 367 с.
3. Вобликов Е.М. Зернохранилища и технологии элеваторной промышленности: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань». – 2005.– 208 с.
4. Волков В.Э. Информационная модель потенциально взрывоопасного объекта. Часть 1 // Автоматизация технологических и бизнес-процессов, 2012. – № 9, 10. – С. 3-11.
5. Волков В.Э. Информационная модель потенциально взрывоопасного объекта. Часть 2 // Автоматизация технологических и бизнес-процессов, 2012. – № 11, 12. – С. 3-9.
6. Волков В.Э. Информационная модель потенциально взрывоопасного объекта. Часть 2 // Автоматизация технологических и бизнес-процессов, 2013. – № 13, 14. – С. 3-8.
7. Отчет «ЦНИИПромзернопроект» о научно-исследовательской работе «Разработать систему взрыворазрядки для технологического оборудования» (промежуточный). Тема 6.604 /Л.И. Семенов, В.Ф. Коцких, Д.В. Зайцев Под ред. Л.И. Семенова. – М.: 1982. Инв. № 02830 083311. – 160 с.
8. Отчет «ЦНИИПромзернопроект» о научно-исследовательской работе «Усовершенствовать нормативно-техническую документацию по взрывобезопасности предприятий по хранению и переработке зерна» (промежуточный). Тема 6.602. В 3 т. : Т. I / Л.И. Семенов, А.А. Равдин, А.А. Захарченко и др. Под ред. Л.И. Семенова. – М.: 1982. Инв. № 02850 055381. – 160 с.
9. Отчет «ЦНИИПромзернопроект» о научно-исследовательской работе «Усовершенствовать нормативно-техническую документацию по взрывобезопасности предприятий по хранению и переработке зерна» (промежуточный). Тема 6.602. В 3 т. : Т. II / Л.И. Семенов, А.А. Равдин, А.А. Захарченко и др. Под ред. Л.И. Семенова. – М.: 1982. Инв. № 02850 055381. – 137 с.
10. Отчет «ЦНИИПромзернопроект» о научно-исследовательской работе «Усовершенствовать нормативно-техническую документацию по взрывобезопасности предприятий по хранению и переработке зерна» (промежуточный). Тема 6.602. В 3 т. : Т. III / Л.И. Семенов, А.А. Равдин, А.А. Захарченко и др. Под ред. Л.И. Семенова. – М.: 1982. Инв. № 02850 055381. – 150 с.
11. Асланов С.К., Волков В.Э. Интегральный метод анализа устойчивости ламинарного пламени. – Физика горения и взрыва, 1991, № 5. – С. 160-166.
12. Aslanov S., Volkov V. On the Instability and Cell Structure of Flames. – Archivum combustionis, 1992, Vol. 12, Nr. 1–4. – P. 81-90.
13. Волков В.Э., Рыбина О.Б. Об устойчивости плоской стационарной волны медленного горения в сжимаемой среде. – Дисперсные системы. XXI научная конференция стран СНГ 20-24 сентября 2004 г., Одесса. Тезисы докладов. – Одесса: "Астропринт", 2004. – С. 75-76.
14. Волков В.Э. Розрахунок довжини преддетонаційної ділянки //Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса, 2009. – Вип. 36, Т. 1. – С. 285-288.
15. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 2. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 360 с.
16. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. – М.: Изд-во АН СССР. – 1963. – 256 с.
17. Волков В.Э. Нечеткая оценка взрывоопасности силосов и силосных корпусов / В.Э. Волков, Н.А. Макоед // Сборник научных трудов международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI-2011)», 16-20 мая 2011 г., Евпатория, Украина. В 2-х томах. Т. 1. Херсон: ХНТУ, 2011. – С. 59-62.