

УДК 661.832.321

**И.С. Потапов, О.А. Федотова, В.З. Пойлов**

Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ**

*Проблема транспортирования удобрения хлорида калия – важный вопрос, от которого зависит сохранение товарных характеристик удобрений при доставке потребителю. При его решении возникает ряд других вопросов, главный из которых заключается в следующем: каким требованиям должны отвечать удобрения, чтобы обеспечить сохранность показателей качества, определяющих нормальное внесение удобрений в почву после транспортировки удобрений потребителю железнодорожным или морским транспортом. Этот вопрос решается путем физического моделирования процессов транспортирования удобрения. Для физического моделирования необходимо изучение влияния температуры, влажности воздуха, статических и динамических нагрузок на изменение физико-механических характеристик флотационного хлорида калия.*

*Собрана стендовая установка, моделирующая перевозку морским транспортом. Проведены тестовые испытания показателей слеживаемости, гигроскопичности, статической прочности гранулированных и негранулированных калийных удобрений на стендовой установке, моделирующей перевозку морским транспортом, а также разработаны рекомендации по выбору оптимальных условий транспортировки морским транспортом, обеспечивающих сохранение физико-механических характеристик поставляемых за рубеж калийных удобрений.*

**Ключевые слова:** калийные удобрения, морской транспорт, хранение и транспортировка, гигроскопичность, слеживаемость, степень уплотнения, товарные характеристики удобрения.

**I.S. Potapov, O.A. Fedotova, V.Z. Poilov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **MODELING OF CHANGES OF PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF POTASH FERTILIZERS AT STORAGE AND TRANSPORTATION SEA TRANSPORT**

*The problem of transporting of such fertilizer as potassium chloride refers to the important issue on which depends the preservation of product fertilizer characteristics during delivery to the consumer. During working on the problem a number of issues occurs: the main among them is about fertilizer requirements in order to ensure the safety of quality which refers to transporting fertilizers by rail or sea. These issues are solved by physical modeling of transporting fertilizers processes.*

*It is necessary for physical modeling to study the influence of temperature, humidity, static and dynamic loads on physical and mechanical characteristics changes of flotation potassium chloride. The testing of caking, hygroscopicity, static strength of granular and non-granulated potash fertilizers are conducted on stand which can simulate maritime transport. Also optimal conditions for transportation by sea are developed. Stand which can simulate maritime transport is developed. Laboratory research of caking, hygroscopicity, static strength of granular and granular potash are conducted. Recommendations on the selection of optimal conditions for transportation by sea, ensuring the preservation of physical and mechanical characteristics supplied abroad potash are investigated.*

**Keywords:** *potash fertilizers, maritime transport, storage and transportation, hygroscopy, caking ability, degree of compaction, commodity characteristics of fertilizers.*

При транспортировке из г. Соликамска или г. Березники в морские порты потребителей удобрений в Бразилии, США, Китае, странах Юго-Восточной Азии, Индии калийные удобрения подвергаются комплексу физико-механических воздействий, связанных с транспортировкой в железнодорожных вагонах, на перевалочных пунктах и временных складах в речных или морских портах, в морских балкерах. Транспортировка хлористого калия морским путем имеет свои особенности. По сравнению с транспортировкой железнодорожным транспортом слой засыпаемых в балкеры удобрений составляет до 15 м, что создает

существенно большие статические нагрузки ( $0,55\text{--}1,65\text{ кг/см}^2$ ), чем нагрузки в железнодорожных вагонах ( $0,19\text{--}0,39\text{ кг/см}^2$ ). Кроме того, продолжительность транспортировки удобрений морским транспортом составляет от 11 до 40 сут, что повышает длительность воздействия статических нагрузок при транспортировке. В то же время колебания температуры в условиях морского транспорта меньше, чем в условиях железнодорожного транспорта: сеть железнодорожных путей пролегает по территории РФ, имеющей резко континентальный климат.

К настоящему времени вопрос моделирования изменений физико-химических характеристик калийных удобрений в процессе хранения и транспортирования морским транспортом практически не изучен. В связи с этим задачей работы являлась разработка стендовой установки, моделирующей условия перевозки насыпью гранулированных и негранулированных калийных удобрений в морских балкерах [1].

Объектом исследования был гранулированный и мелкозернистый хлорид калия СКПРУ-2 ОАО «Уралкалий». ОАО «Уралкалий» занимает одно из лидирующих мест на крупнейших мировых рынках минеральных удобрений. Основные производственные мощности ОАО «Уралкалий» расположены в Пермском крае (г. Березники и г. Соликамск). Гранулированный хлорид калия представляет собой прессованные гранулы неправильной формы размером 2–4 мм с массовой долей хлорида калия не менее 95 % (в пересчете на  $\text{K}_2\text{O}$  не менее 60 %). Мелкозернистый хлорид калия представляет собой мелкие кристаллы со средним размером 0,3–0,4 мм серовато-белого цвета или мелкие зерна различных оттенков красно-бурого цвета с массовой долей калия в пересчете на  $\text{K}_2\text{O}$  не менее 58 % [2, 3].

Доставка калийных удобрений зарубежным потребителям производится через морские порты в Санкт-Петербурге, Вентспилсе и на Дальнем Востоке.

Для установления изменений свойств хлорида калия при транспортировании морским транспортом необходимо изучить влияние условий транспортирования  $\text{KCl}$  на изменение физико-механических свойств удобрений  $\text{KCl}$ . К таковым относятся:

- влияние статической нагрузки на статическую прочность и долю разрушенных гранул гранулированного  $\text{KCl}$ ;
- влияние статической нагрузки на гранулометрический состав мелкозернистого хлорида калия;

- влияние относительной влажности среды, статической нагрузки на гигроскопичность гранулированного и мелкозернистого KCl;
- влияние статической нагрузки на слеживаемость и степень уплотнения слоя хлорида калия.

Разработана стендовая установка, моделирующая условия транспортирования удобрений насыпью морским транспортом (рис. 1).

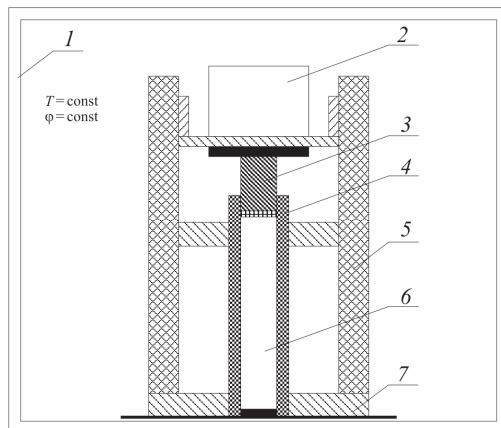


Рис. 1. Принципиальная схема стендовой установки, моделирующей условия транспортирования удобрений насыпью морским транспортом: 1 – климатическая камера; 2 – груз; 3 – шток; 4 – герметичный контейнер; 5 – крепежные стенки; 6 – образец KCl; 7 – днище

Стендовая установка представляет собой герметичный контейнер с испытуемым образцом хлорида калия. Образец KCl подвергается расчетной статической нагрузке, моделирующей процесс транспортирования в балкере или сухогрузе при заданных длительности, температуре и влажности. Для моделирования климатических условий используется климатическая камера.

Стендовая установка снабжена комплексом приборов, обеспечивающих прецизионные измерения указанных характеристик: аналитические весы ВЛТЭ-150; анализатор влажности MS70; прибор для измерения прочности гранул ИПГ-1М; прибор для измерения слеживаемости ACAP EASY; виброгрохот; лазерный анализатор размеров пылевидных частиц Mastersizer 2000. Кроме того, в состав измерительного комплекса входят приборы для оценки состояния поверхности и дефектов гранул образцов: оптический микроскоп Axio Imager фирмы «Цейс» и электронный микроскоп S3400N фирмы HITACHI.

В процессе транспортирования морским транспортом продукт подвергается значительной статической нагрузке, что влияет на статическую прочность и содержание разрушенных гранул гранулированного хлорида калия. В связи с этим было исследовано влияние величины статической нагрузки на содержание разрушенных гранул (фракции менее 2 мм) и статическую прочность гранул гранулированного КС1. Результаты исследования влияния статической нагрузки на статическую прочность и содержание разрушенных гранул (–2 мм) гранулированного хлорида калия представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние статической нагрузки на статическую прочность и содержание разрушенных гранул гранулированного хлорида калия

| Статическая нагрузка,<br>кгс/см <sup>2</sup> | Статическая прочность,<br>кгс/ гран. | Содержание разрушенных<br>гранул, % |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,00                                         | 6,66±0,02                            | –                                   |
| 0,52                                         | 6,60±0,02                            | 3,32±0,02                           |
| 1,03                                         | 6,50±0,02                            | 7,51±0,02                           |
| 1,55                                         | 6,31±0,02                            | 9,30±0,02                           |

Из представленных данных видно, что при увеличении статической нагрузки средняя статическая прочность гранул КС1 незначительно снижается и увеличивается содержание разрушенных гранул. Так, для исходного хлорида калия статическая прочность составляет 6,66 кгс/гран. После проведения испытаний под действием статических нагрузок 0,53, 1,03 и 1,55 кгс/см<sup>2</sup> в течение 16 сут величина статической прочности уменьшается и составляет 6,60, 6,50 и 6,33 кгс/гран. соответственно, а доля разрушенных гранул увеличивается с 3 до 9 %.

Были проведены исследования по изучению влияния величины статической нагрузки на гранулометрический состав и средний размер частиц мелкозернистого КС1 [4, 5].

Результаты изучения влияния величины статической нагрузки на гранулометрический состав мелкозернистого КС1 приведены на рис. 2.

Из приведенных данных видно, что с увеличением статической нагрузки с 0,53 до 1,55 кгс/см<sup>2</sup> происходит разрушение частиц КС1, что приводит к увеличению пылевидной фракции (+0,315–0,125 мм) с 1,1 до 2,9 %, а средний размер частиц уменьшается с 0,814 до 0,700 мм.

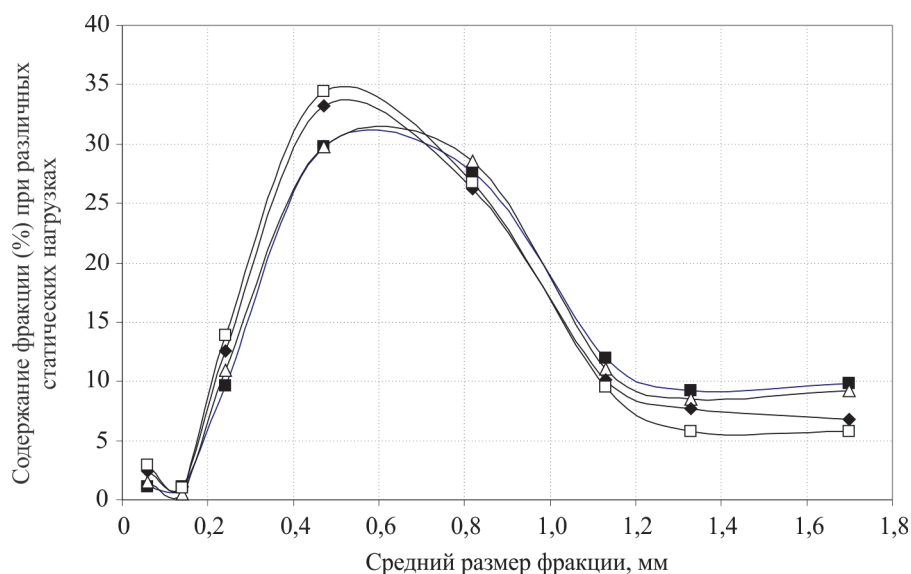


Рис. 2. Влияние величины статической нагрузки на гранулометрический состав мелкозернистого KCl: —■— статическая нагрузка 0 кг/см<sup>2</sup>; —◆— статическая нагрузка 1,03 кг/см<sup>2</sup>; —△— статическая нагрузка 0,52 кг/см<sup>2</sup>; —□— статическая нагрузка 1,55 кг/см<sup>2</sup>

Результаты исследования влияния длительности, статической нагрузки и относительной влажности воздушной среды на гигроскопичность гранулированного и мелкозернистого хлорида калия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние длительности выдержки, статической нагрузки и относительной влажности воздушной среды на гигроскопичность гранулированного и мелкозернистого хлорида калия

| № п/п | Относительная влажность воздушной среды, %                                  | Влажность гранулята (%) через заданные промежутки времени, ч |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|       |                                                                             | 0                                                            | 24    | 48    | 72    | 120   |
| 1     | Гранулированный хлорид калия, статическая нагрузка 0,53 кгс/см <sup>2</sup> |                                                              |       |       |       |       |
|       | 80                                                                          | 0,168                                                        | 0,130 | 0,132 | 0,134 | 0,137 |
|       | 100                                                                         | 0,168                                                        | 2,355 | 3,834 | 3,704 | —     |
| 2     | Гранулированный хлорид калия, статическая нагрузка 1,55 кгс/см <sup>2</sup> |                                                              |       |       |       |       |
|       | 80                                                                          | 0,217                                                        | 0,125 | 0,131 | 0,131 | 0,132 |
|       | 100                                                                         | 0,217                                                        | 2,566 | 4,002 | 4,059 | —     |
| 3     | Мелкозернистый хлорид калия, статическая нагрузка 0,53 кгс/см <sup>2</sup>  |                                                              |       |       |       |       |
|       | 80                                                                          | 0,185                                                        | 0,143 | 0,155 | 0,177 | 0,222 |
|       | 100                                                                         | 0,185                                                        | 3,280 | 7,231 | —     | —     |
| 4     | Мелкозернистый хлорид калия, статическая нагрузка 1,55 кгс/см <sup>2</sup>  |                                                              |       |       |       |       |
|       | 80                                                                          | 0,180                                                        | 0,155 | 0,183 | 0,190 | 0,226 |
|       | 100                                                                         | 0,180                                                        | 4,714 | 8,187 | —     | —     |

С увеличением относительной влажности воздушной среды и длительности выдержки в ней образцов гранулята и мелкозернистого КСІ во влажной атмосфере гигроскопичность продукта возрастает. При этом величина статической нагрузки практически не влияет на величину гигроскопичности.

Из анализа данных табл. 2 видно, что при влажности среды 80 % гигроскопичность *гранулированного КСІ*, подвергаемого статическим нагрузкам, уменьшается в первые 24 ч выдержки, а при влажности среды 100 % существенно возрастает с течением времени.

Гигроскопичность *мелкозернистого КСІ* при относительной влажности среды 100 % уже через 24 ч превышает требования ТУ и составляет 3,28 и 4,714 % при статической нагрузке 0,53 и 1,55 кг/см<sup>2</sup> соответственно. Из полученных данных можно сделать вывод, что хранение и транспортирование мелкозернистого КСІ насыпью при относительной влажности менее 80 % возможно в течение короткого времени, а при относительной влажности более 80 % хранение и транспортирование мелкозернистого КСІ насыпью приводит к значительному поглощению влаги, обводнению, что может привести к изменениям других физико-химических свойств.

При измерении слеживаемости [6] одновременно проводили измерение степени уплотнения слоя соли КСІ при заданных статических нагрузках. Для определения этих характеристик применяли анализатор АСАР ЕASY. Изучение влияния статической нагрузки процесса сжатия гранулированного и мелкозернистого хлорида калия на слеживаемость и степень уплотнения проводили при величине сжатия образца 0,52, 1,03, 1,55 кгс/см<sup>2</sup>. При изучении транспортирования удобрений в железнодорожных вагонах установлено, что степень уплотнения слоя гранулированного и мелкокристаллического продуктов КСІ мало меняется с изменением длительности сжатия (с 5 до 15 мин), поэтому изучение процесса сжатия проводили в течение 5 мин. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Из приведенных данных видно, что с увеличением воздействующей статической нагрузки с 0,52 до 1,55 кгс/см<sup>2</sup>, соответствующей высотам насыпного слоя соли в трюме корабля 5 и 15 м, степень уплотнения слоя соли мелкозернистого хлорида калия возрастает с 6,03 до 7,18 % и не изменяется для гранулированного хлористого калия. При этом коэффициент слеживаемости равен нулю. При всех исследуемых статических нагрузках степень уплотнения мелкозернистого хлорида

Таблица 3

Влияние статической нагрузки и длительности сжатия  
на слеживаемость и степень уплотнения слоя продукта KCl

| Статическая нагрузка, кг/см <sup>2</sup> | Степень уплотнения слоя соли, % |                    | Коэффициент слеживаемости, кг/см <sup>2</sup> |                    |
|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|--------------------|
|                                          | Гранулированный KCl             | Мелкозернистый KCl | Гранулированный KCl                           | Мелкозернистый KCl |
| 0,52                                     | 5,56                            | 6,03               | 0                                             | 0                  |
| 1,03                                     | 5,65                            | 6,16               | 0                                             | 0                  |
| 1,55                                     | 5,71                            | 7,18               | 0                                             | 0                  |

калия выше на 0,47–1,47 %, чем для гранулированного, из-за гранулометрического состава образцов. Для гранулированного и мелкозернистого хлорида калия при транспортировании морским транспортом, в котором нижние слои продукта испытывают статическую нагрузку не более 1,55 кг/см<sup>2</sup>, слеживание продукта не должно происходить.

### Выводы

1. Разработана стендовая установка, и проведены тестовые испытания физико-механических характеристик (гранулометрического состава, статической прочности, гигроскопичности, слеживаемости и степени уплотнения) мелкозернистого и гранулированного флотационного хлорида калия СКПРУ-2 ОАО «Уралкалий».

2. Выявлено влияние статической нагрузки на статическую прочность и долю разрушенных гранул гранулированного KCl, на гранулометрический состав мелкозернистого хлорида калия; влияние относительной влажности среды, статической нагрузки на гигроскопичность гранулированного и мелкозернистого KCl, влияние статической нагрузки процесса сжатия на слеживаемость и степень уплотнения слоя хлорида калия.

3. Установлено, что при увеличении статической нагрузки средняя статическая прочность гранулированного KCl незначительно снижается, а содержание разрушенных гранул (–2 мм) увеличивается.

4. Определено, что с увеличением статической нагрузки содержание пылевидной фракции (+0,315–0,125) мелкозернистого KCl возрастает, а средний размер частиц уменьшается, что объясняется разрушением частиц KCl.



5. С увеличением относительной влажности воздушной среды и длительности выдержки в ней образцов гранулята и мелкозернистого КС1 во влажной атмосфере гигроскопичность продукта возрастает. При этом величина статической нагрузки практически не влияет на величину гигроскопичности.

6. Показано, что хранение и транспортирование мелкозернистого КС1 насыпью при относительной влажности менее 80 % возможно в течение короткого времени, а при относительной влажности более 80 % хранение и транспортирование мелкозернистого КС1 насыпью приводит к значительному поглощению влаги, обводнению, что может привести к изменениям других физико-химических свойств.

7. Установлено, что с увеличением воздействующей статической нагрузки с 0,52 до 1,55 кгс/см<sup>2</sup>, соответствующей высотам насыпного слоя соли в трюме корабля 5 и 15 м, степень уплотнения слоя соли мелкозернистого хлорида калия возрастает с 6,03 до 7,18 % и не изменяется для гранулированного хлористого калия. При этом коэффициент слеживаемости равен нулю. При всех исследуемых статических нагрузках степень уплотнения мелкозернистого хлорида калия выше (на 0,47–1,47 %), чем гранулированного.

8. Стендовые испытания показали, что для гранулированного и мелкозернистого хлорида калия при транспортировании морским транспортом с влажностью воздуха не более 80 %, в котором нижние слои продукта испытывают статическую нагрузку не более 1,55 кг/см<sup>2</sup>, слеживание продукта не должно происходить.

### **Список литературы**

1. Терещенко А.Г. Гигроскопичность и слеживаемость растворимых веществ: монография. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 78 с.
2. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н.Н. Тетерина, Р.Х. Сабилов, Л.Я. Сквирский, Л.Н. Кириченко; под ред. Н.Н. Тетериной. – Пермь: Соликамска типография, 2002. – 484 с.
3. Федотова О.А. Исследование процесса смачиваемости пылевидного КС1, содержащего примеси флотореагентов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 24, № 1. – С. 53–56.
4. Кувшинников И.М. Минеральные удобрения и соли: Свойства и способы их улучшения. – М.: Химия, 1987. – 256 с.

5. Технология неорганических веществ и минеральных удобрений / Е.Я. Мельников, В.П. Салтанова, А.М. Наумова, Ж.С. Блинова. – М.: Химия, 1983. – 482 с.

6. Позин М.Е., Зинюк Р.Е. Физико-химические основы неорганической технологии. – Л.: Химия, 1985. – 384 с.

## References

1. Tereschenko A.G. Gigroskopichnost i slezhivaemost rastvorimyykh veschestv [Hygroscopicity and caking solubles]. Tomsk: Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2011. 78 p.

2. Teterina N.N., Sabirov R.H., Skvirskiy L.Ja., Kirichenko L.N. Tekhnologiya flotatsionnogo obogascheniya kaliynykh rud [Technology potash ore flotation]. Ed. by N.N. Teterina. Perm: Solikamska tipografiya, 2002. 484 p.

3. Fedotova O.A. Issledovanie protsessa smachivaemosti pylevidnogo KCl, sodershashego primesi flotoreagentov [Investigation of the process of wettability pulverized KCl, containing impurities flotoreagents]. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2013, vol. 24, no. 1, pp. 53–56.

4. Kuvshinnikov I.M. Mineralnye udobreniya i soli: Svoystva i sposoby ikh uluchsheniya [Fertilizers and salts: Properties and ways to improve them]. Moscow: Khimiya, 1987. 256 p.

5. Melnikov E.Ya., Saltanova V.P., Naumova A.M., Blinova Zh.S. Tekhnologiya neorganicheskikh veschestv i mineralnykh udobreniy [Technology of inorganic substances and fertilizers]. Moscow: Khimiya, 1983. 482 p.

6. Pozin M.E., Zinyuk R.E. Fiziko-khimicheskie osnovy neorganicheskoy tekhnologii [Technology of inorganic substances and fertilizers]. Leningrad: Khimiya, 1985. 384 p.

## Об авторах

**Потапов Игорь Сергеевич** (Пермь, Россия) – технолог кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: asp-potapov@mail.ru).

**Федотова Ольга Александровна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: chydinova.olga@rambler.ru).

**Пойлов Владимир Зотович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: Vladimirpoilov@mail.ru).

### **About the authors**

**Igor S. Potapov** (Perm, Russian Federation) – technologist, department of chemical technology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: asp-potapov@mail.ru).

**Olga A. Fedotova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of technical science, associate professor, department of chemical technology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: chydinova.olga@rambler.ru).

**Vladimir Z. Poilov** (Perm, Russian Federation) – doctor of technical sciences, professor, head of department of chemical technology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: Vladimirpoilov@mail.ru).

Получено 09.07.2014