

УДК 629.735.015

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна,
Асовский Алексей Валериевич

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СНОСА
ПРИ ОПРЫСКИВАНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ
СУДАМИ НА БАЗЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАССЕЯНИЯ
ВЕЩЕСТВ**

Показана актуальность оценки сноса при опрыскивании сельскохозяйственных угодий с применением беспилотных воздушных судов, рассмотрены особенности и существующие методики оценки сноса загрязняющих веществ, предложены программные средства для расчетно-теоретических оценок сноса на базе локальной модели рассеяния при опрыскивании беспилотными воздушными судами вертолетного типа, представлены отдельные результаты оценки сноса препаратов при защитном опрыскивании гексакоптером типа DJI Agras T20 в ожидаемых условиях выполнения авиационных работ, сделаны выводы по влиянию на показатели сноса значимых факторов проведения обработок сельскохозяйственных культур и рекомендации по использованию полученных результатов.

Беспилотное воздушное судно (БВС), опрыскивание, снос капель, локальная модель, параметры внесения, плотность выпадения препарата.

Asovsky Valery Pavlovich, Kuzmenko Alla Sergeevna,
Asovsky Alexey Valeryevich

**CALCULATION AND THEORETICAL ASSESSMENT OF
DEMOLITION WHEN SPRAYING BY UNMANNED AIRCRAFT BASED
ON A LOCAL SUBSTANCE DISPERSION MODEL**

The article shows the relevance of assessing drift when spraying agricultural land using unmanned aerial vehicles. The features and existing methods for assessing the drift of pollutants are considered, software tools are proposed for theoretical and theoretical assessments of drift based on a local model of dispersion during spraying by helicopter-type unmanned aerial vehicles. Separate results of assessing the drift of preparations during protective spraying with a DJI Agras T20 hexacopter under the expected conditions of aerial work are presented. Conclusions were drawn on the influence of significant factors of crop treatment on the drift indicators and recommendations on the use of the results obtained.

Unmanned aircraft (UAV), spraying, droplet drift, local model, application parameters, drug deposition density

Введение

Снос как явление неуправляемого переноса внесенных при обработке рабочих жидкостей за пределы обрабатываемого участка является важной и значимой проблемой обеспечения эффективности и экологической безопасности процессов химизации сельского и лесного хозяйства ([1-3 и др.]). Особую остроту и злободневность оценка сноса приобретает применительно к новым агротехническим приемам, одним из которых является защитное опрыскивание с применением беспилотных воздушных судов (БВС), прежде всего вертолетного типа.

Применительно к любому агротехническому приему опрыскивания заданным препаратом с соответствующей нормой внесения рабочей жидкости и дозировкой препарата к наиболее существенным показателям сноса относятся удаление переноса опасных веществ от обрабатываемого участка и их распределение в зоне оседания в условиях проведения обработки. Эти показатели, как показывает анализ, определяются, в частности, физико-химическими свойствами вносимого вещества, начальными параметрами выпуска и дисперсным составом частиц вещества, состоянием приземного слоя атмосферы и другими факторами. В этой связи можно отметить, что снос является сложным многофакторным процессом, описание которого обусловлено необходимостью определения и оперирования множества разнообразных исходных параметров, что, с одной стороны, чрезвычайно затрудняет процедуру показателей сноса, и, с другой, повышает неопределенность оцениваемых показателей.

Снос капель рабочей жидкости при выполнении опрыскивания по своей сути является одной из разновидностей процессов распространения (дрейфа) в приземном слое атмосферы (ПСА) и выпадения на подстилающую поверхность мелкодисперсных частиц различных загрязняющих (представляющих опасность) твердых и жидких веществ. Ввиду многообразия и важности этих процессов для состояния окружающей среды к настоящему времени у нас в стране и за рубежом разработаны разнообразные методики оценки показателей этих процессов, преимущественно для отравляющих, радиоактивных и других особо опасных загрязняющих веществ ([4-8 и др.]). В основе этих методик лежит методический подход представления дрейфа и выпадения частиц в виде случайного гауссовского процесса с

учетом в его детерминированной части известных значимых факторов и вероятностных параметров рассеяния частиц в процессе их движения.

В рамках настоящей работы в качестве основы для проведения оценок была использована «Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах» ([7]). Представленная в ней локальная модель рассеивания частиц позволяет для стационарных горизонтально-однородных метеоусловий оценить показатели сноса, включая плотность выпадения вещества частиц на подстилающую поверхность, на удалениях от их источника до 10 км при высоте выбросов частиц до 150 м. Достоинствами этой методики, в частности, являются возможность широкого варьирования значимых факторов (дисперсность частиц, высота и мощность их выпуска за единицу времени, состояние ПСА и т.д.), использование в ней значительного объема экспериментальных данных и эмпирических выражений, описывающих внутренние и внешние связи процесса сноса, возможность проведения специальных расчетов, например, по размерам частиц, с последующим интегрированием по всему диапазону изменений, а также ориентированность модели на ее программную реализацию.

В процессе исследований применительно к опрыскиванию БВС сельскохозяйственных культур была выполнена адаптация изложенной в [7] последовательности и математических моделей проведения оценок, сформирован и апробирован программный код расчетов по определению плотности выпадения пестицида на подстилающую поверхность ($\text{мл}/\text{м}^2$) в зависимости от удаления зоны выпуска жидкости в заданных условиях обработок. Отдельные результаты проведенных с использованием этого кода оценок сноса пестицидов представлены ниже.

Основная часть

Исходные данные для проведения расчетно-теоретических оценок сноса по локальной модели рассеяния при опрыскивании БВС, прежде всего мощности и высоты выпуска препаратов, в процессе исследований формировались на базе принятых технологических параметров и внешних условий обработок для заданного БВС с использованием данных анализа результатов моделирования процессов осаждения капель рабочей жидкости разных фракций. Как показали выполненные ранее исследования ([1-3, 9, 10 и др.]), при опрыскивании сносу и потерям подвержены в основном капли с начальным размером (диаметром) до 80-100 мкм, в связи с чем для проведения оценок использовался дискретный ряд размерностей капель рабочей

жидкости в указанных пределах с приведением к ним данных «прилежащих» диапазонов из спектра выпущенных форсунками БВС капель.

На рис. 1 для примера использования сформированного в работе программного кода показаны расчетные величины приведенной плотности выпадения препарата капель размером 15, 25 и 35 мкм при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 обработки полевых культур с нормой внесения рабочей жидкости (водный 10 % раствор «среднего» пестицида ([2])) 10 л/га (по пестициду – 1 л/га (0,1 мл/м²)) на скорости 5 м/с и высоте 3 м при ширине захвата 6 м (используются 4 штатные форсунки типа TeeJet XR110-01 с общим выпуском жидкости 1,8 л/мин. (30 мл/с) с ее диспергированием, соответствующем медианно-объемному диаметру (МОД) 190 мкм) в утреннее время (7.00) летнего периода (начало июня) при небольшой облачности (2 балла) и ветре 1 м/с (слабая неустойчивость, категория С (параметр Тернера $P_t = 2,27$)).

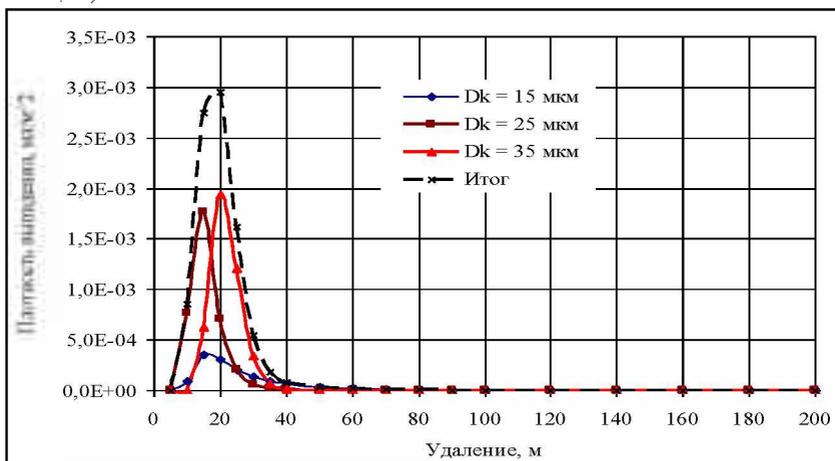


Рис. 1. Расчетная приведенная плотность выпадения капель препарата с характерными размерами при выполнении гексакоптером обработки с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м в условиях слабой неустойчивости и ветре 1 м/с

Как видно из этого графика, при единичном пролете БВС в заданных условиях наибольший осадок при сносе капель рабочей жидкости наблюдается в непосредственной близости от линии пролета (10 – 40 м), при этом максимальная приведенная плотность препарата для сносимых капель разных фракций пропорциональна мощности их выпуска. В свою очередь, при сносе более крупные и менее летучие капли препарата выпадают на

поверхности более плотно и концентрировано, а мелкие характеризуются более «размытым» характером выпадения и повышенными значениями дрейфа (сноса). Примечательно, для рассмотренного пролета уровень загрязнения существенно падает даже при небольших удалениях от линии пролета и составляет 10, 1 и 0,1 % от максимальной итоговой плотности, составляющей около 3 % от требуемой на участке дозировки препарата ($X_w = 20$ м), при X_w соответственно примерно 30, 50 и 110 м. Важнейшим и достаточно очевидным фактором, влияющим на снос мелкодисперсных частиц, является скорость ветра. Для оценки влияния этого фактора на показатели сноса препарата на рис. 2 показаны интегральные по размерам капель приведенные плотности выпадения препарата для указанного выше режима в условиях слабой неустойчивости атмосферы для скоростей ветра 1, 2 и 4 м/с.

Из представленных на графике данных можно, в частности, отметить:

- рост скорости ветра при опрыскивании ББС при прочих равных условиях приводит к более сильному растягиванию капель в направлении ветра и уменьшению при этом максимальных величин плотности выпадения препарата (при скоростях ветра 2 и 4 м/с примерно в 1,4 и 2,1 раза в сравнении со слабым ветром 1 м/с);

- эффект растягивания при сносе капель при усилении ветра проявляется также в увеличении удалений от линии пролета выпадения вещества с одинаковой плотностью, в частности, плотности осадка на уровне 0,1 и 0,01 % заданной для обработки дозировки препарата (0,1 мл/м²) при скоростях ветра 1, 2 и 4 м/с достигаются соответственно на удалениях примерно 38, 55 и 75 м и 75, 140 и 230 м, т.е., несмотря на более низкие локальные максимумы плотности выпадения препарата, при усилении ветра наблюдается рост удалений от линии пролета зон с сопоставимыми абсолютными величинами плотностей осадка.

На параметры сноса препаратов в заданных внешних условиях определенное влияние оказывают и технологические параметры авиаопрыскивания, такие как рабочая высота полета, норма внесения рабочей жидкости и концентрация препарата в ней, дисперсный состав вносимой жидкости и т.д.

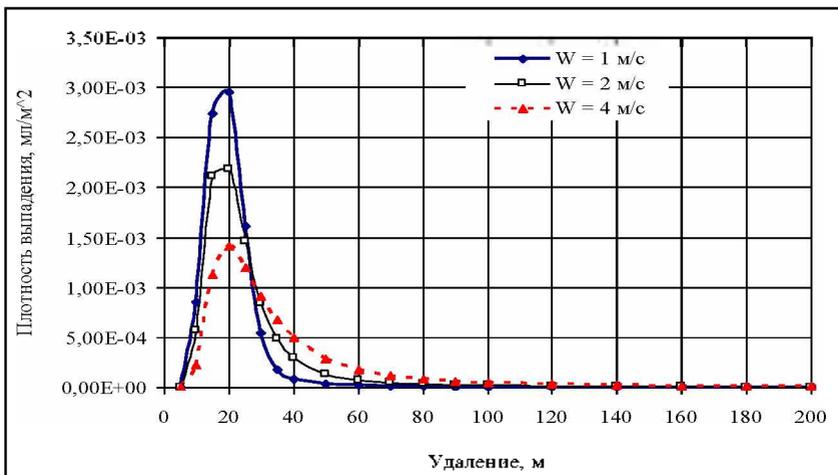


Рис. 2. Расчетная приведенная плотность выпадения мелкодисперсных капель препарата при выполнении БВС обработки с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м в условиях слабой неустойчивости при разной скорости ветра

Влияние рабочей высоты на показатели сноса для базового варианта опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 в условиях слабой неустойчивости ПСА и ветре 2 м/с иллюстрирует рис. 3.

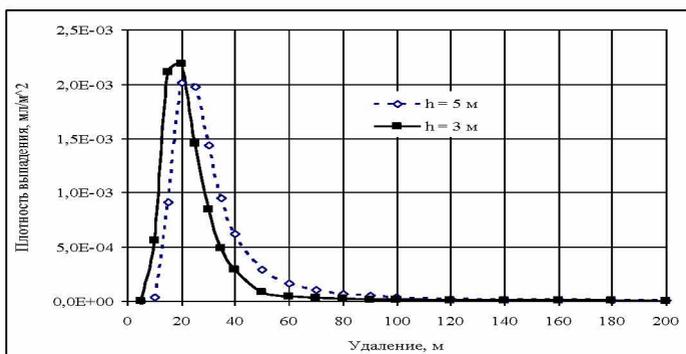


Рис. 3 - Расчетная приведенная плотность выпадения мелкодисперсных капель препарата при выполнении гексакоптером обработки с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с в условиях слабой неустойчивости при ветре 2 м/с для разных высот внесения

Как видно из этого рисунка, изменение высоты полета БВС не оказывает принципиального влияния на показатели сноса пестицида, однако

уменьшение высоты полета с 5 до 3 м приводит к более компактному выпадению препарата направлению ветра и некоторому уменьшению пороговых для заданного уровня плотности осадка удалений от линии пролета, например, для $q_{пр}$ на уровне 10^{-4} и 10^{-5} мл/м² соответственно с 70 до 45 м и со 175 до 115 м, т.е. примерно на 30 %.

Современные БВС для внесения веществ в сельском хозяйстве имеют важную опцию, связанную с возможностью проведения работ в ночное время. В этой связи представляет интерес показатели сноса в разное время суток. Для этого были рассмотрены характерные варианты выполнения обработок в летний период (июнь) в условиях Южного федерального округа при характерных метеопараметрах:

- утром (7.00) – при слабой неустойчивости ПСА (класс С, $R_t = 2,27$) при температуре 20°C и ветре 2 м/с;
- днем (14.00) – при умеренной неустойчивости (класс В, $R_t = 1,96$) при температуре 25°C и ветре 4 м/с;
- ночью (2.00) – при умеренной устойчивости (класс F, $R_t = 5,33$) при температуре 15°C и ветре 1 м/с;

Для этих вариантов на рис. 5 показаны приведенные плотност выпадения препарата при опрыскивании БВС с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м.

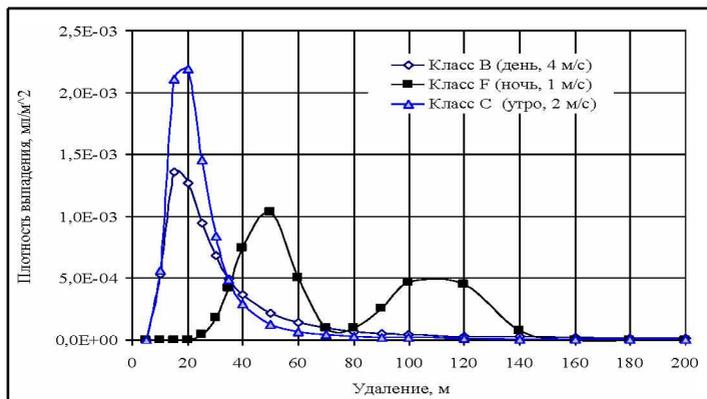


Рис. 4. Расчетная приведенная плотность выпадения капель препарата для обработки гексакоптером с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м в различных условиях стратификации приземного слоя атмосферы

Из представленных сравнительных данных можно выделить следующее:

- утренняя обработка (класс С) при небольшом ветре отличается наивысшим уровнем максимальной плотности выпадения пестицида примерно в 20 м от линии пролета БВС и компактным характером распределения осадка с превышением уровня, например, 0,1 % от заданной дозировки на участке на удалении до 55 м с последующим постепенным уменьшением плотности осадка при увеличении Xw ;

- дневная обработка (класс В) при сильном ветре отражает отмеченные ранее особенности влияние скорости ветра и характеризуется уменьшением величины максимума плотности выпадения препарата относительно утренней обработки при его сопоставимом положении ($Xw \approx 15$ м) и более объемным осадком по мере смещения капель от линии пролета с пороговым удалением отмеченного выше уровня около 75 м при снижении плотности выпадения для больших удалений;

- ночная обработка (класс F) при слабом ветре по показателям сноса существенно отличается от предыдущих вариантов, что обусловлено наличием на эюре распределения плотности осадка двух локальных максимумов плотности, «сдвинутых» по направлению ветра соответственно на 50 и 100 м от линии пролета, при их более низких абсолютных величинах в сравнении с другими вариантами и практически полного отсутствия выпадения препарата на удалении от источника более 200 м (расчетные $q_{пр}$ менее 10^{-12} мл/м², для вариантов утренней и дневной обработок на уровне соответственно менее 10^{-6} и 10^{-5} мл/м²).

С учетом представленных замечаний следует отметить, что широко распространенное в настоящее время мнения об полном или практическом отсутствии сноса при выполнении БВС защитного опрыскивания в ночное время не соответствует действительности, поскольку для этого варианта снос исчезающее мал на значительных удалении от линии пролета (200 м и более), в то время как на меньших удалении значимое выпадение препарата имеет место.

Полученные плотности выпадения препарата при единичном пролете БВС позволяют оценить качественные и количественные особенности сноса мелкодисперсных капель рабочей жидкости при выполнении опрыскивания, однако не отражают общий уровень загрязнения в результате сноса на примыкающие к участку обработки зоны при выполнении последовательных проходов БВС над участком.

Эти показатели оценивались посредством моделирования сплошной обработки БВС заданного участка и наложением на примыкающую к нему зону «хвостов» соответствующих эпюр для каждого последующего прохода.

На рис. 5 для примера представлены расчетные данные интегральной приведенной плотности выпадения капель препарата на участок и за его пределы при выполнении БВС различного количества N проходов над участком при его обработке с нормой 10 л/га и шириной захвата 6 м в условиях слабой неустойчивости (утро) и боковом ветре 2 м/с для рабочей высоты 3 м.

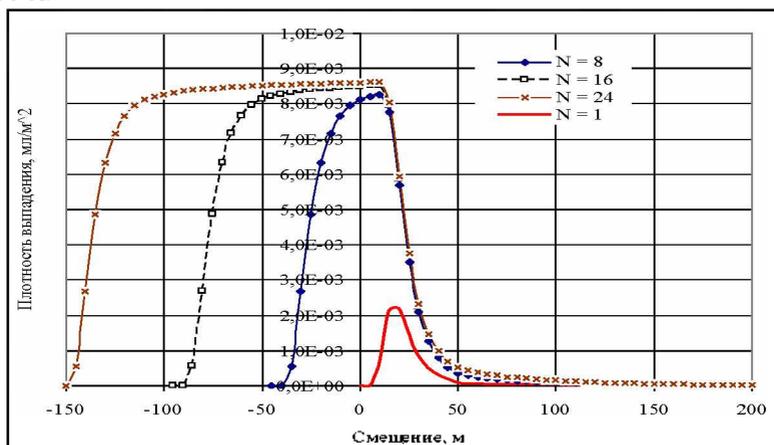


Рис. 5. Интегральная приведенная плотность выпадения капель препарата при выполнении БВС проходов при типовой обработке с нормой 10 л/га на рабочей высоте 3 м в условиях слабой неустойчивости и боковом ветре 2 м/с

Сравнение полученных данных позволяет выделить ряд важных обстоятельств реализации и последствий сноса препаратов при производстве обработок:

- общее распределение плотности выпадения капель препаратов при обработке участка как совокупности наложения эпюр единичных проходов БВС существенным образом отличается от соответствующих базовых единичных эпюр и зависит от ширины обрабатываемого участка (количества проходов (гонов) N);

- максимальная приведенная плотность выпадения препарата в зоне сноса при обработке БВС участков наблюдается в пределах 20 м от границы

участка и в 3,5-5 раз превосходит соответствующие величины для единичных проходов и растет при увеличении количества гонов (проходов) при обработке;

- при удалении от границы обрабатываемого участка более 50 м плотность выпадения препарата при обработках может на порядок (до 10-12 раз) превосходить показатели для единичных проходов БВС с увеличением такого превышения при росте числа проходов при обработке;

- с учетом роста интегральных приведенных плотностей выпадения препарата при производственных обработках в сравнении с единичными проходами пороговые границы сноса для фиксированных значений плотности осадка существенно расширяются, в частности, для уровня осадения 10^{-4} мл/м² (0,1 % от заданной дозировки препарата на участке) с 45 до 120 м для рабочей высоты полета 3 м и с 70 до 160 м соответственно для высоты 5 м (примерно в 2,5 раза);

- для рассмотренных выше средних условий выполнения гексакоптером DJI Agras T20 защитного опрыскивания с нормой внесения 10 л/га и дозировкой препарата 1 л/га в качестве ориентира опасного сноса препаратов на уровне 1 % от заданной дозировки препарата можно определить расстояние в пределах 40-60 м;

- при производстве обработок БВС суммарная доля выпавших за пределами участка подверженного сносу при единичных пролетах объема препаратов для рабочей высоты полета 3 (5) м при увеличении числа пролетов (гонов) с 8 до 24 снижается с 38 (52) до примерно 13 (19) %,

т.е. для разных вариантов примерно 62 – 87 % потенциально опасных с точки зрения сноса объемов препарата в мелкодисперсных каплях фактически «возвращаются» на участок, выравнивая тем самым плотность покрытия объектов обработки каплями и внесенную на них дозировку препарата.

Выводы

На основании проведенных на базе локальной модели рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере расчетно-теоретических оценок показателей сноса пестицидов при опрыскивании БВС на примере гексакоптера DJI Agras T20 сформирован и апробирован программно-методический инструментарий для соответствующих оценок и получен достаточный массив расчетных данных и качественных теоретических закономерностей для разработки технологических инструкций по применению БВС вертолетного типа для производства авиационных работ по защитному опрыскиванию полевых культур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техника и технология безопасного применения средств защиты растений: Лекции курсов по контролю за качеством применения пестицидов. - Госагропром СССР: Сибга-Гейги АГ, 1989.

2. Технические средства и технологические особенности применения гербицидов и арборицидов на объектах несельскохозяйственного пользования: Научно-практическое руководство. - М.: РАСХН-ГНУ ВНИИФ, 2009. — 68 с.

3. Опрыскивание от А до Я. 3-е изд. «Теория и практика опрыскивания». Lechler GmbH, Метцинген, Германия. 2020. - 80 с.

4. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74. – М.: Стройиздат (Госстрой СССР), 1975 - 40 с.

5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, ОНД-86.-Л.: Гидрометеониздат, 1986.-94 с.

6. Методика определения площади зоны защитных мероприятий, устанавливаемой вокруг объектов по хранению химического оружия и объектов по уничтожению химического оружия. Утв. Министерством обороны Российской Федерации 26.03.1999 г.

7. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Руководящий документ РД 52.18.717-2009. – Обнинск: ООО «Принт-Сервис», 2009. –113 с.

8. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утв. Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. – 79 с.

9. *Асовский В.П.* Теория и практика авиационного распределения веществ. - М.: Воздушный транспорт, 2008. - 580 с.

10. *Robert N. Klein.* Spray Drift Management. / Proceeding of the 2007 CPM Shot Course and MCPR Trade Show – Minneapolis Convention Center. 04-06.2007.

Асовский Валерий Павлович, доктор технических наук, ученый секретарь НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: vasov63@mail.ru.

Кузьменко Алла Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов Южного федерального университета, 347900 Россия, город Таганрог, переулок Тургеневский, 44, e-mail: akuzm@sfnu.ru.

Асовский Алексей Валериевич, инженер-программист НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: asoval@mail.ru.

Asovsky Valery Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, scientific secretary of NPK «ПАНХ», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: vasov63@mail.ru.

Kuzmenko Alla Sergeevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Aircraft of Radio Engineering Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, trans. Turgenevsky, 44, phone: +7 (8634) 37-16-97, e-mail: akuzm@sfedu.ru.

Asovsky Aleksey Valerievich, Software engineer of NPK «ПАНХ», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: asoval@mail.ru.