УДК 629.735.45

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

В.В. ДУДНИК, А.С. КОПКИН, А.С. ГУРИНОВ
(Донской государственный технический университет)

Представлена методика проведения и результаты экспериментов по определению размеров частиц, необходимых для выполнения расчетов осаждения капель. Дисперсность капель при малообъемном опрыскивании определена методами анализа негативов фотографий следов. Выполнены расчеты и проведен контроль плотности распределения жидких частиц, выброшенных с вертолета Ми-2 в условиях встречного и бокового ветра.
Ключевые слова: *сельскохозяйственный вертолет, авиахимические работы, снос химикатов.*

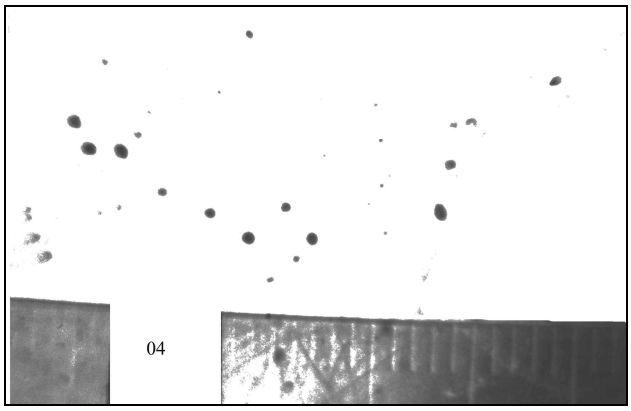
Введение. Упрощенная модель осаждения капель, представленная в работе [1], позволяет демонстрировать движение частиц при заданных условиях наличия ветра. Однако для выполнения расчетов и сравнения их с реальными данными необходимо определить диаметр самих частиц и дисперсность распределения диаметров. Для решения этой задачи были проанализированы различные методы. Наиболее простыми с точки зрения оснащения эксперимента являются анализы отпечатков капель на бумаге или стекле. Эксперименты показали, что крупные капли делают на бумаге отпечатки, достаточные для анализа. Сложнее исследовать капли мелкого диаметра – менее 500 мкм. Как правило, на бумаге остается след, нечеткий для анализа. Мелкие капли ясно видны на стеклах в инвертированном изображении.

Исследование оседания мелкодисперсных капель. Для проверки возможности использования частично автоматизированного метода определения дисперсности частиц был проведен эксперимент с частицами, выброшенными микрокапельной аппаратурой RG03 и MICRONAIR AU5000.

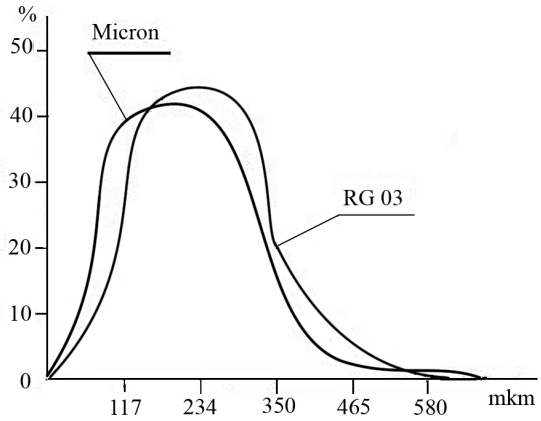
Для уменьшения влияния испарения и орографической турбулентности эксперимент проводился ранним утром. В качестве носителя использовался дельталет МД50, оснащаемый поочередно распылительной аппаратурой MICRONAIR AU5000 и RG03. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор белого красителя. В ходе проведения эксперимента с высоты 2,5 м осуществлялось распыление раствора на одиннадцать прямоугольных стеклянных пластин, выложенных в линию, перпендикулярную траектории пролета летательного аппарата, на расстоянии ±15м от нее.

После выполнения первого выброса осуществлялась замена аппаратуры на другой тип и повторялся пролет над новыми стеклами. Несколько стекол со свежими каплями фотографировали сбоку. Все полученные 22 отпечатка высушивали и фотографировали в плане на черном фоне с масштабной линейкой. Для этого использовался фотоприбор с 10-кратным увеличением. Пример такого отпечатка показан на рис.1, *а*. Для получения средней зависимости диаметра капли, находящейся в полете, от диаметра контрольного отпечатка использовались фотографии капель сбоку. Эта зависимость была найдена путем расчета объема частиц через интегрирование высоты по контуру капли.

Увеличенные фотографии капель в плане измеряли, а полученные данные пересчитывали в диаметры сферических частиц. Всего было проанализировано 198 капель, распыленных аппаратурой MICRONAIR AU5000, и 189 капель, распыленных аппаратурой RG03. Интегрированные данные дисперсности частиц представлены в таблице и на рис.1, *б*.



а)



б)

Рис.1. Негативы отпечатков частиц в плане (*а*) и дисперсность частиц, выброшенных распылительной аппаратурой MICRONAIR AU5000 и RG03 (*б*)

Интегрированные данные дисперсности частиц

Средний диаметр капли в полете, мкм	Количество капель, %, аппаратура MICRONAIR AU5000	Количество капель, %, аппаратура RG03
117	28,4	39,1
234	44,3	40,8
350	20,4	16
465	6,2	2,38
580	0,7	1,7

Анализ результатов эксперимента подтвердил, что данный метод может быть использован для определения диаметра частиц даже малого размера. В данном случае было установлено, что дисперсность частиц, распыленных аппаратурой MICRONAIR AU5000 и RG03, имеет близкие характеристики. На момент проведения измерений аппаратура MICRONAIR AU5000 была настроена на средний диаметр частиц – 186 мкм аппаратура RG03 – на 234 мкм. Для более крупных капель возможно применение данного метода, использующего отпечатки на бумаге.

Эксперименты по проверке адекватности осаждения частиц проводились на каплях большого диаметра, так как контролировать осаждение более мелких частиц в условиях бокового ветра весьма сложно из-за большой ширины следа и недостаточной четкости отпечатков.

В ходе эксперимента производился выброс капель красящего раствора синего цвета. Для этого использовалась сельскохозяйственная аппаратура вертолета Ми-2. Полет осуществлялся с параметрами, соответствующими режимам авиационно-химической обработки растений с высоты 4 м. На поверхности земли раскладывались три полосы белой бумаги шириной 0,297 м и длиной 38 м. Для эксперимента использовалась стандартная конфигурация комплекта распылительной аппаратуры, настроенная на крупнокапельную обработку ($d_{ср}$ = 550 мкм). При этом центральная штанга оборудования была заглушена. Это было сделано с учетом того, что именно боковые штанги оказывают наибольшее воздействие на снос химикатов. Кроме того, такое распыление позволяло отследить не только внешние границы обработанного участка, но и ширину участка, обработанного каждой боковой штангой.

В настоящее время получение контрольных отпечатков путем осаждения красителя или химического реагента в некоторых случаях используется для проверки распыляющей аппаратуры сельскохозяйственных летательных аппаратов. Однако обработка полученных результатов проводится приближенно, путем визуального анализа отпечатков. В данном случае был использован метод компьютерной обработки данных осаждения красителя.

Было выполнено два пролета над контрольными участками с распылением красителя: первый – в условиях правого бокового ветра; второй – в условиях встречного ветра. Скорость ветра контролировалась анемометром У-4, установленным на высоте 2,8 м при помощи шеста. Бумага раскладывалась поперек линии движения вертолета. На контрольной отметке бокового ветра располагались две полосы бумаги. Схема расположения полос бумаги показана на рис.2. Одна из них протянулась относительно отметки на 4 м вправо и 34 м влево. Другая была установлена симметрично отметке на расстоянии 1,5 м от первой полосы. Некоторый разнос полос по дистанции представлял интерес для выявления возможной продольной неравномерности распределения капель.

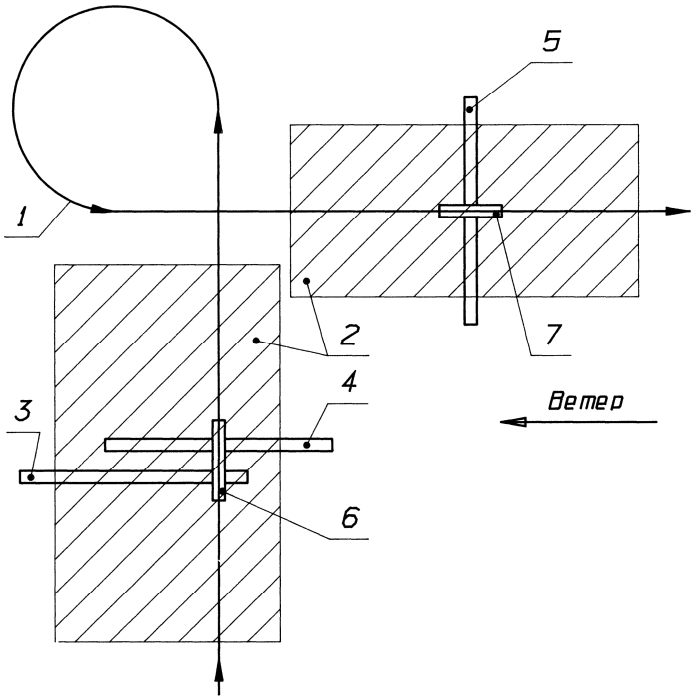


Рис.2. Схема проведения эксперимента по изучению реального распределения химикатов:
1 – траектория вертолета; 2 – зона обработки; 3 – контрольный отпечаток №1;
4 – контрольный отпечаток №2; 5 – контрольный отпечаток №3; 6 – отметка №1; 7 – отметка №2

В качестве отметок использовались полосы бумаги длиной 5 м. Такая конфигурация отметок позволяла точнее наводить вертолет на требуемую траекторию движения. Контрольная отметка №2 была расположена вдоль направления движения ветра на достаточно большом расстоянии, обеспечивающем отсутствие капель, выброшенных в районах отметок №1 и №2. Третья полоса бумаги располагалась симметрично отметке №2.

После проведения наземной подготовки эксперимента в химические баки вертолета был залит красящий состав. Масса вертолета была близка к массе воздушного судна, работающего в режиме сельскохозяйственной обработки с 50%-ным остатком химиката, так как на борту находился дополнительный запас топлива. Движение вертолета осуществлялось по заранее намеченной траектории, показанной на рис.2. Выброс красителя осуществлялся дважды, в районах отметок №1 и №2 (заштрихованные зоны). Не долетая ~ 30 м до полос, летчик начинал опрыскивание и заканчивал его, пролетев за полосы ~ 30 м. После просушивания полос бумаги на них остались следы синего цвета, хотя и бледные, но достаточные для их идентификации. Бумагу с контрольными отпечатками разрезали на прямоугольники размером 200x297 мм и подвергали сканированию.

Анализ результатов эксперимента. После сканирования рисунка в черно-белом диапазоне запрашивался номер оттенка каждого пикселя. Сканированное изображение приводилось по идентификационным зависимостям к массе единичного пикселя и всего листа. Для упрощения расчетов и сокращения времени обработки данных идентификационная зависимость – номер пикселя и плотность раствора – была принята линейной. Она основана на результатах сканирования листа белой бумаги, одна сторона которого покрыта раствором массой 10 грамм ($m_э$ = 0,01 кг), применявшимся на вертолете. При разрешении оттенков до 255 средний номер для такого листа ($N_э$) составлял 163. Оттенок 255 соответствовал белому цвету (N5), 0 – черному. Масса красителя на единичном пикселе в таком случае может быть представлена как

$$m_i = \frac{N_б - N_i}{N_б - N_э} \frac{m_э}{(n_Г - n_О)(n_В - n_О)}, \quad (1)$$

где N_i – номер оттенка текущего пикселя; $n_г$ – количество пикселей по горизонтали в одном листе; $n_в$ – количество пикселей по вертикали в одном листе; $n_о$ – ширина в пикселях от границы листа до начала контрольной площади (запас на возможные дефекты по краям листа).

Масса красителя, осаженного на лист,

$$m_л = \sum_{n_О}^{n_Г - n_О} \sum_{n_О}^{n_В - n_О} m_i . \quad (2)$$

Для уменьшения времени обработки данных разрешение при сканировании было принято 75dpi, что составляло 590x876 пикселей. Учитывая большой размер капель, указанное разрешение может быть вполне допустимым. С учетом запаса по краям листа (~2 мм, $n_о$=6) идентификационную зависимость, определяющую массу красителя на одном листе, можно записать следующим образом:

$$m_л = \sum_{6}^{584} \sum_{6}^{870} \frac{(255 - N_i)}{(255\text{-}163)} \frac{0{,}01}{864 \times 578} = \sum_{6}^{584} \sum_{6}^{870} (255 - N_i) \cdot 2{,}173 \cdot 10^{-10}, \quad (3)$$

где N_i – номер оттенка текущего пикселя листа.

Чтобы уменьшить неравномерность, вызванную влиянием мелких сдвигов атмосферы, сразу суммировалась масса красителя на пяти листах (их суммарная длина – 1 метр).

После обработки контрольных отпечатков были получены результаты, представленные на рис.3. Как видно из рисунка, на перекрытом участке (–19…+4 м) на большинстве отрезков данные распределения плотности химикатов по дистанции меняются незначительно. Контрольный отпечаток №3 соответствует распылению, полученному при движении вертолета в условиях встречного ветра. По данным анемометра, скорость ветра составляла 1,8 м/с. В соответствии с эмпирическими зависимостями для приземного слоя атмосферы на высоте выброса красителя скорость будет равна 2,05 м/с. Данные, приведенные на рис.3, показывают, что плотности распределения химикатов справа и слева от вертолета весьма схожи, однако существует некоторое расхождение результатов на отдельных отрезках. Очевидно, это вызвано погрешностью сканирования и неравномерностью движения воздушных масс вблизи летательного аппарата. На несимметричность результатов также может оказывать существенное влияние тот факт, что для эксперимента использовался обычный вертолет, работавший перед этим на авиахимической обработке растений. Вследствие этого некоторые элементы опрыскивающего оборудования сельскохозяйственного летательного аппарата подвержены неравномерной эрозии и коррозии.

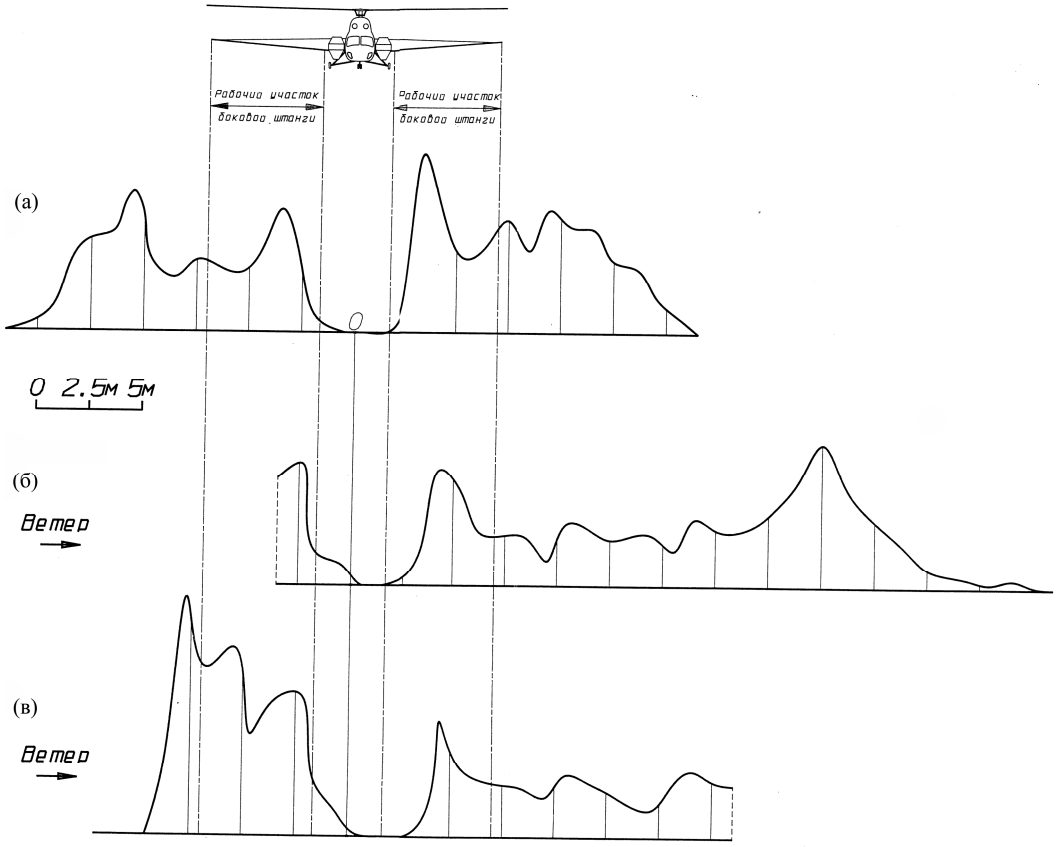


Рис.3. Результаты замеров плотности распределения осаждения капель, выброшенных вертолетом Ми-2 при встречном и боковом ветре 2,05 м/с: *а* – отпечаток №3; *б* – отпечаток №1; *в* – отпечаток №2

Анализируя результаты обработки данных всех контрольных отпечатков, следует отметить некоторые общие тенденции. На всех графиках четко отслеживается значительное количество красителя в центральной части, в начале полосы оседания. Этот максимум, очевидно, обусловлен высокой степенью давления жидкости на входе в распылительную штангу. Еще один максимум наблюдается ближе к концу распыленной полосы. Этот пик вызван использованием распылительной форсунки увеличенного диаметра на внешнем торце штанги. Более крупные капли из этой форсунки меньше подвержены влиянию вихрей, поэтому, несмотря на наличие боковой скорости, падают ближе к оси симметрии, чем мелкие капли из соседних форсунок.

Интегрированные данные показали, что правая штанга выбросила значительно меньше красителя, чем левая. Очевидно, это вызвано дефектами химического оборудования вертолета – неравномерной коррозией стенок трубопроводов и накоплением твердого осадка вблизи форсунок.

Полученные данные подтверждают результаты расчетов, выполненные по алгоритмам модели осаждения капель. При наличии бокового ветра полоса, соответствующая штанге, расположенной с подветренной стороны, существенно сжимается, а полоса, соответствующая противоположной штанге, – растягивается. Соответственно и плотность концентрации с одной стороны возрастает, а с другой – падает.

Параметры условий, существовавших во время опыта, были использованы для теоретического эксперимента с крупными каплями и введены в программу решения уравнений движения капель. Сравнение результатов расчетов и замеров представлено на рис.4, 5. Теоретическая модель достаточно хорошо объясняет данные, полученные в реальном эксперименте. Ясно видно,

что на асимметрию обработки, даже при небольшом боковом ветре, существенное влияние оказывает взаимодействие капель с вихревыми жгутами. Некоторое различие в величине внутренней границы полосы обработки, очевидно, объясняется торможением индуктивного потока у земли, но это явление практически не оказывает влияния на значение сноса. Небольшая плотность вещества, существующая за внешней границей теоретической полосы обработки, объясняется наличием спектра капель меньшего диаметра в распыленном облаке.

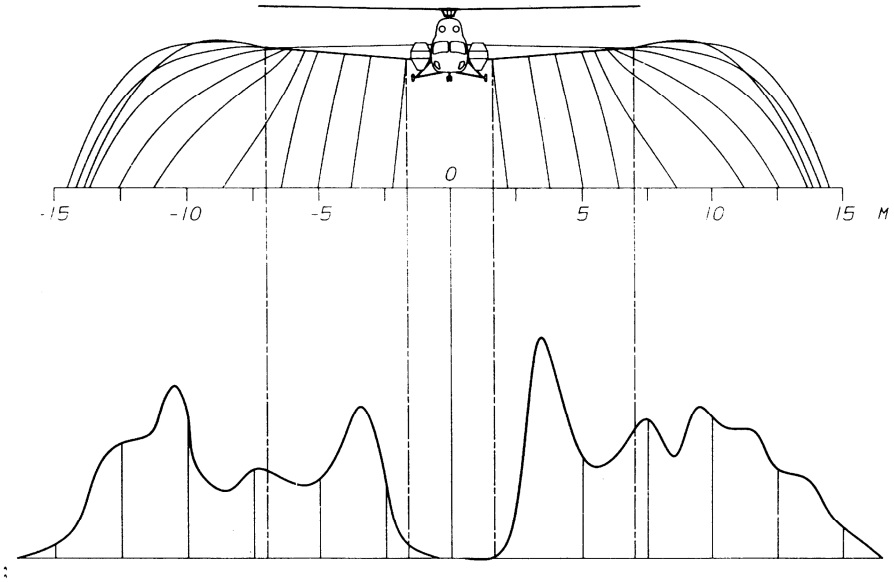


Рис.4. Сравнение результатов расчетов и результатов замеров плотности распределения химикатов при встречном ветре

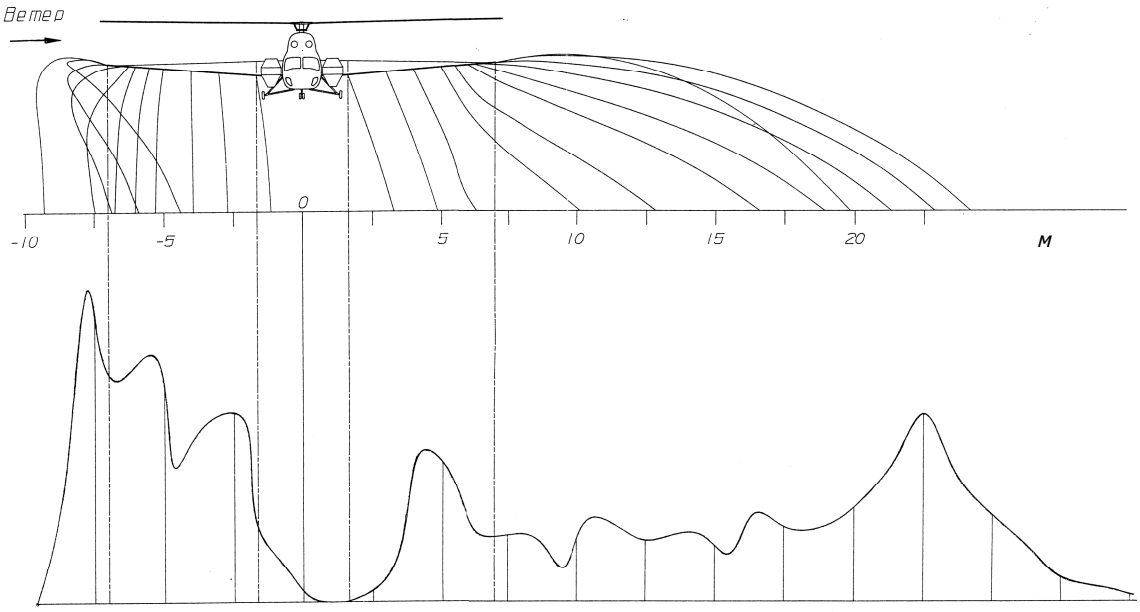


Рис.5. Сравнение результатов расчетов и замеров плотности распределения химикатов в условиях бокового ветра

Выводы. Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили рассчитанные особенности движения капель, выброшенных с сельскохозяйственного вертолета. Как и предполагалось, воздействие бокового ветра привело к сужению полосы обработки, относящейся к подветренной штанге, и значительному расширению противоположной полосы обработки. При этом наблюдается существенная асимметрия плотности распределения химиката. В целом результаты экспериментов подтвердили адекватность модели [1] осаждения капель.

Библиографический список

1. Дудник В.В. Упрощенная модель визуализации осаждения капель при проведении авиахимических работ с использованием вертолета / В.В. Дудник // Научный вестн. МГТУ ГА. – 2011. – №1 (163). – С.191-199.

Материал поступил в редакцию 09.03.11.

References

1. Dudnik V.V. Uproschennaya model' vizualizacii osajdeniya kapel' pri provedenii aviahimicheskih rabot s ispol'zovaniem vertoleta / V.V. Dudnik // Nauchnyi vestn. MGTU GA. – 2011. – №1 (163). – S.191-199. – In Russian.

FIELD RESEARCH OF AGRICULTURAL AIR VEHICLE CHEMICAL EQUIPMENT

V.V. DUDNIK, A.S. KOPKIN, A.S. GURINOV
(Don State Technical University)

Methods and results of the experimentation on the particle-size determination essential in calculating drops concretion are offered. Drop dispersivity under low-volume spraying is specified by the analysis methods of traces negatives. Calculations and checking of distribution density of fluid particles dropped by MI-2 helicopter have been done under adverse and cross wind.
Keywords: *agricultural helicopter, aviation chemical works, drift of chemicals.*