

В.П. Асовский, А.С. Кузьменко

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО
ОПРЫСКИВАНИЯ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ
АВИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИХ РАБОТ**

Рассмотрены отдельные практические вопросы решения задач совершенствования технологии авиационно-химических работ с использованием методов компьютерного моделирования его процессов, в частности на нетрадиционных режимах авиационного опрыскивания. Эти режимы характерны для обработок участков с препятствиями на границах, когда внесение рабочих жидкостей производится при снижении воздушного судна в заходе на производственный проход над участком на требуемой высоте полета и наборе высоты после его окончания. Проведенные расчетно-теоретические исследования на примере самолета-биплана Ан-2 с использованием разработанных и апробированных ранее многофакторных программных средств моделирования процессов формирования вихревого следа самолета и осадения в нем характерного для авиационного опрыскивания спектра капель рабочих жидкостей показали, что использование нетрадиционных технологических режимов обработок способно существенно повысить производительность, безопасность и интегральную эффективность авиационно-химических работ и мероприятий химизации сельскохозяйственного производства в целом. В частности, показано, что для повышения эффективности авиационного опрыскивания участков, ограниченных препятствиями, технически возможно и экономически целесообразно использовать схему проведения работ, предусматривающую начало и окончание обработки таких участков на этапе снижения и набора высоты при удалениях от препятствий, соответствующих 1-2 с полета воздушного судна (для самолета Ан-2 на удалениях 50–150 м при высоте полета до 20 м). Такая схема обеспечивает рост производительности авиационного опрыскивания до 10–15 %, уменьшение себестоимости обработок на 3–5 % и увеличения экономической эффективности на 2–3 % при росте их суммарного эффекта на 6–8 %.

Авиационно-химические работы; авиационное опрыскивание; компьютерное моделирование; воздушное судно; режимы полета; осадение; производительность; эффективность.

V.P. Asovsky, A.S. Kuzmenko

**COMPUTER SIMULATION OF AVIATION SPRAYING WHEN IMPROVING
THE TECHNOLOGY OF AERIAL-CHEMICAL WORKS**

The article considers some practical issues of solving the problems of improving the technology of aerial-chemical works using methods of computer modeling of its processes, in particular, on non-traditional modes of aviation spraying. These modes are typical for the treatment of areas with obstacles at the borders, when the introduction of working fluids is carried out when the aircraft descends in the approach to the production passage over the area at the required flight altitude and climb after its end. The carried out computational and theoretical studies on the example of the An-2 biplane aircraft using the previously developed and tested multifactor software tools for modeling the processes of forming a vortex trace of an aircraft and depositing in it a spectrum of drops of working fluids characteristic of aviation spraying have shown that the use of unconventional technological treatment modes can significantly increase the productivity, safety and integral efficiency of aerial-chemical works and measures for chemicalization of agricultural production in general. It is shown that to increase the efficiency of aviation spraying of areas limited by obstacles, it is technically possible and economically feasible to use a work scheme that provides for the beginning and end of processing of such areas at the stage of descent and climb at distances from obstacles corresponding to 1-2 seconds of the aircraft flight (for An-2 aircraft at distances of 50–150 m at a flight altitude of up to 20 m). Such a scheme provides an increase in the productivity of aviation spraying up to 10–15 %, a reduction in the prime cost of treatments by 3–5 % and an increase in economic efficiency by 2–3 % with an increase in their total effect by 6–8 %.

Aerial-chemical works; aerial spraying; computer simulation; aircraft; flight modes; deposition; productivity; efficiency.

Введение. Авиационно-химические работы (АХР), предусматривающие внесение воздушными судами (ВС) различных жидких, сыпучих и биологических веществ, являются значимым фактором обеспечения деятельности и эффективности сельского, лесного и коммунального хозяйства страны [1, 2]. Не смотря на более чем полувековой опыт массового производства АХР и отработанные на практике технологические режимы выполнения этих работ до настоящего времени остаются нерешенными ряд проблем, связанных с обеспечением качества и эффективности таких обработок.

Одной из таких проблем при производстве авиационного опрыскивания, составляющего до 90 % всех объемов АХР, является невозможность проведения с использованием традиционного способа опрыскивания при горизонтальном полете ВС с заданной предельно малой высотой обработок концевых участков сельскохозяйственных угодий с препятствиями на их границах, что значительно уменьшает производительность и конкурентоспособность выполнения АХР. Решение этой проблемы, как показывает анализ, возможно только с использованием нетрадиционных способов авиационного опрыскивания на режимах переменных высот полета ВС, характерных для снижения и набора высоты при полете ВС над концевыми участками с препятствиями на границах.

Предварительная оценка применимости и параметров авиационного опрыскивания на таких нетрадиционных режимах возможна с применением методов компьютерного моделирования его процессов, являющегося, как показывает опыт [2–5 и др.], мощным средством оперативных и малозатратных исследований показателей производства АХР и основным элементом проведенных работ.

Основная часть. Основными значимыми препятствиями на границах сельскохозяйственных участков в настоящее время являются защитные лесополосы (ЛП), которые являются частью агролесомелиоративного комплекса и играют важную роль в борьбе с эрозионными процессами, предотвращении засухи, улучшения биомикроклимата почв и повышении урожайности ([6–8 и др.]). Высота защитных ЛП в зависимости от почвенно-климатических условий варьируется от 6 до 22 м и определяет типовые размеры сельскохозяйственных участков (длину, ширину) в соответствующих условиях [6, 8 и др.]. Степень обеспеченности сельскохозяйственных угодий ЛП в наиболее развитых сельскохозяйственных регионах страны (Краснодарский край, Ростовская область и др.) в настоящее время превышает 60 % при средней их высоте $H_{\text{ЛП}} = 12\text{--}16$ м, т.е. проблема обработок участков с препятствиями на границах для этих регионов имеет массовый и значимый характер, что определяет актуальность ее решения.

Расчеты показывают, что при нормируемой для АХР безопасной высоте прохода ВС над препятствиями $H_{\text{без}} = 10$ м [9, 10] при высоте ЛП в пределах 10–20 м размах концевых зон участков, которые не обрабатываются при традиционной технологии опрыскивания, составляет 400–700 м, что ограничивает возможности авиационной обработки участков, особенно с малой длиной гона. Аналогичный диапазон при возможном уменьшении $H_{\text{без}}$ до 5 м составляет 270–550 м, что несколько расширяет возможности проведения АХР в таких условиях, но потенциально связан со снижением безопасности полетов и не может рассматриваться как действенное средство решения указанной проблемы. Примечательно, что при обработке сельхозучастков с характерными соотношениями размеров при длине фактического гона на АХР в пределах 500–2000 м остается не обработанными от 60–80 до 15–25 % площади подлежащих обработке участков, что связано с уменьшением заказов на проведение АХР, особенно небольших участков, и дополнительными затратами заказчиков АХР на «доработку» необработанных зон с использованием наземной техники. Это обстоятельство дополнительно подчеркивает масштаб проблемы обработки при АХР концевых участков и необходимость ее исследования и решения.

В рамках проведенных исследований для решения указанной проблемы в среде программирования DELPHI был сформирован расчетный комплекс моделирования авиационного внесения рабочих веществ. В нем на новом уровне были реализованы апробированные ранее [2] математические модели описания условий и процессов осаждения капель многокомпонентных рабочих жидкостей с учетом испарения компонентов, диффузии, вращения и дробления капель в поле индуктивных скоростей вихревого следа ВС с возможностью его построения методом дискретных вихрей [11–13 и др.], в т.ч. при вертикальном и горизонтальном маневрировании ВС.

Оценка адекватности и точности сформированного программного комплекса проводилась сравнением имеющихся экспериментальных и полученных для одинаковых условий с использованием комплекса расчетных данных для традиционных режимов авиационного опрыскивания наиболее распространенного при производстве АХР самолета-биплана Ан-2. Анализ показал, что, не смотря на объективный стохастический характер процессов и показателей авиационного опрыскивания, для расчетных и экспериментальных данных наблюдается качественная близость (вид эпюр, соотношения показателей, порядок соответствующих величин и т.д.) и имеет место статистическая значимость полученных при моделировании расчетных функциональных зависимостей, что указывает на адекватное отражение сформированным программным комплексом сути и особенностей осаждения рабочих веществ для рассмотренных условий [14]. В свою очередь, точность оценки наиболее значимых обобщенных показателей внесения (ширина захвата, объемы и количество капель жидкости и др.) для рассмотренных вариантов составляет примерно 4-5 %, что следует признать достаточно высоким показателем для моделируемого процесса и позволяет использовать программный комплекс для оценки нетрадиционных режимов авиационного опрыскивания.

Проведенные расчеты конфигурации вихревого следа самолета Ан-2 при реализации типовой схемы полета при опрыскивании участков с препятствиями (ЛС) на границах (рис. 1) показывают, что формирование вихревого следа при этом качественно идентично стационарному режиму горизонтального полета на рабочей для опрыскивания высоте.

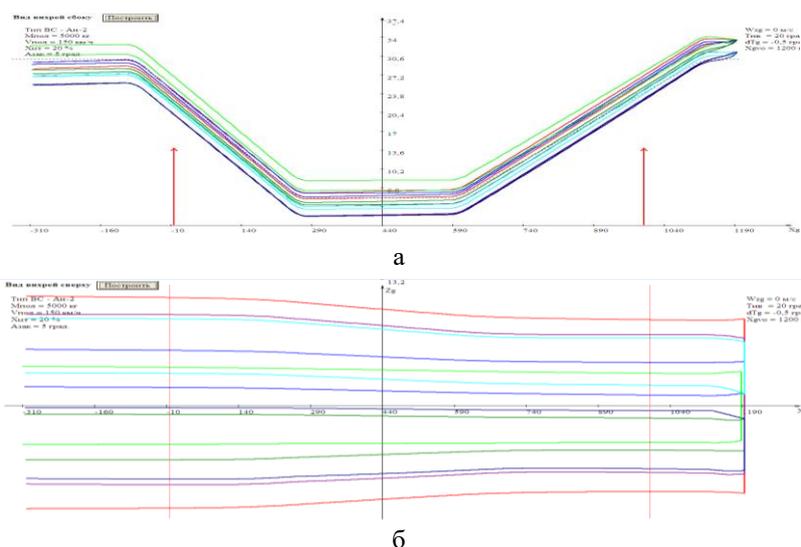


Рис. 1. Расчетная конфигурация (вид сбоку (а) и сверху (б)) вихревого следа самолета Ан-2 ($V=150$ км/ч) при обработке участка длиной 1 км с препятствиями на границах ($H_{п} = 14$ м, $H_{без} = 10$ м)

В частности можно отметить сильное взаимодействие между собой свободных вихрей П-образных вихревых комбинаций крыльев и элементов их механизации, воздушного винта и оперения самолета с их смещением относительно линии пролета, формирование 2 характерных концевых вихревых «сгустков» свободных вихрей и т.д. [14], однако такой след значительно отличается по пространственной конфигурации, прежде всего в вертикальной плоскости ввиду изменения высот полета при заходе самолета на гон и выходе из него с учетом высоты препятствий.

Полученная конфигурация вихревого следа и динамика его формирования позволяет выполнить моделирование процессов осаждения капель рабочих жидкостей, выпущенных с самолета на отмеченных элементах полета самолета над концевыми зонами обрабатываемого участка.

На рис. 2 и 3 для примера показаны расчетные эпюры счетного и объемного (по действующему веществу) распределения в волнах осаждения рабочей жидкости при опрыскивании самолетом Ан-2 [15, 16] с нормой 50 л/га ($V = 150$ км/ч, закрылки 5° , $H_p = 5$ м, [17] соответственно на режиме снижения (заход на гон) и при выходе из гона.

По результатам компьютерного моделирования для отмеченных нетрадиционных режимов опрыскивания, в частности, определено:

- ◆ эпюры распределения жидкости на обрабатываемом участке для режимов вертикального маневрирования самолета (при снижении и наборе высоты) существенно отличаются от традиционного режима опрыскивания («База (ГП)»);
- ◆ при опрыскивании концевых зон на режиме снижения наблюдается локальный рост концентрации капель и действующего вещества вдоль линии пролета и поперечное «поджатие» волны осаждения жидкости ($Z_{ср}$) при усилении этих тенденций по мере увеличения высоты выпуска жидкости (начала опрыскивания);

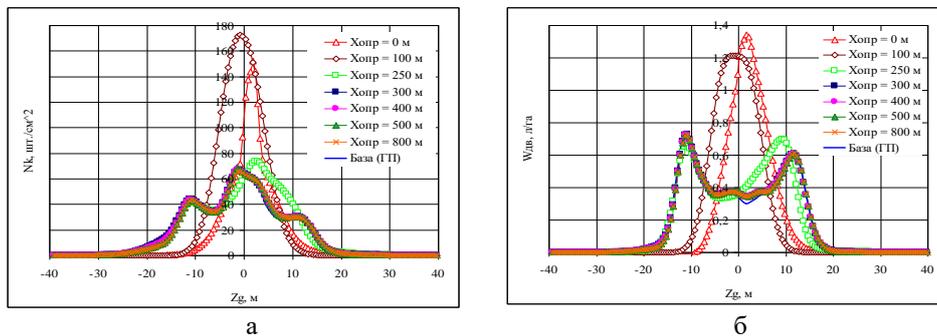


Рис. 2. Расчетные эпюры счетного (а) и объемного (по действующему веществу, б)) распределения в волнах осаждения при опрыскивании самолетом Ан-2 с нормой 50 л/га на режиме снижения и гоне

◆ для опрыскивания на режиме набора высоты при прочих одинаковых условиях характерно усиливающееся с высотой «растягивание» волны оседающей жидкости в поперечной плоскости и наличие ярко выраженных двух относительно однородных «пиков» показателей слева и справа от линии пролета;

◆ изменение показателей волн осаждения жидкости, выпущенной на режимах вертикального маневрирования над концевыми зонами обрабатываемых участков, в целом связаны с уменьшением доли осевшей жидкости и ее дисперсности при росте концентрации препаратов в жидкости на участке, а также снижению при обработке с заданной шириной захвата средних величин плотности капель и дозировки препарата и их равномерности, что связано с падением показателей биологической эффективности авиационной обработки в концевых зонах.

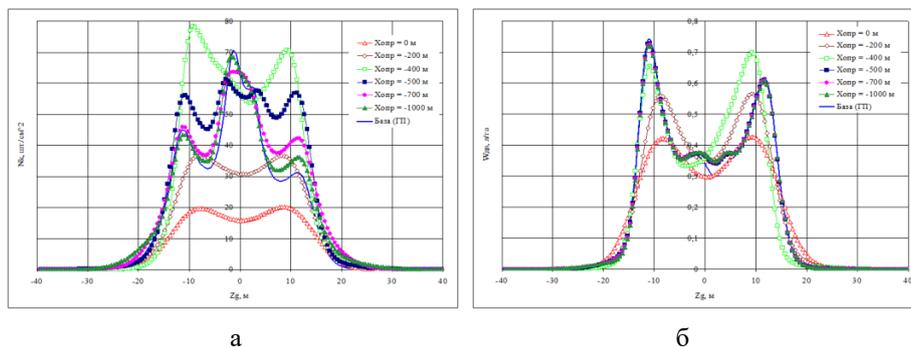


Рис. 3. Расчетные эпюры счетного (а) и объемного (по действующему веществу, б)) распределения в волнах осадения при опрыскивании самолетом Ан-2 с нормой 50 л/га при выходе из гона

В табл. 1 и 2 для рассмотренных выше режимов опрыскивания и волн осадения показаны основные расчетные показатели волны осадения и защитного опрыскивания самолета Ан-2 для выпуска рабочей жидкости соответственно при снижении и наборе высоты, а также для полета на гоне.

Таблица 1

Основные показатели волны осадения и защитного опрыскивания самолета Ан-2 для выпуска рабочей жидкости при снижении и на гоне

Хор, м	Нор, м	Vy, м/с	Показатели волны осадения				Показатели внесения при Zp = 30 м				
			Zcp, м	Kп, %	Kw, %	МОД, мкм	Ncp, шт./см²	Kvp, %	Wcp, мл/га	Kvw, %	Рэф
0	24	-3	40,8	51,0	87,4	295,9	36,2	112,3	391,7	115,0	0,625
100	16,8	-3	54,3	56,3	90,9	338,65	51,4	118,6	398,5	118,2	0,744
250	6,1	-2,5	65,3	61,6	93,4	375,4	48,3	28,5	472,0	29,5	0,999
300	5	0	63,8	58,2	92,3	387,49	45,1	24,7	456,3	29,1	0,999
400	5	0	66,8	57,0	91,5	394,08	44,7	31,3	462,2	8,3	0,998
500	5	0	64,3	57,4	92,2	388,4	44,6	26,5	456,6	28,1	0,999
800	5	0	65,0	57,6	92,1	389,01	44,7	25,4	456,2	28,5	0,999
База	5	0	62,3	56,4	90,9	395,28	43,6	28,1	448,3	31,8	0,997

Таблица 2

Основные показатели волны осадения и защитного опрыскивания самолета Ан-2 для выпуска рабочей жидкости при наборе высоты и на гоне

Хор, м	Нор, м	Vy, м/с	Показатели волны осадения				Показатели внесения при Zp = 30 м				
			Zcp, м	Kп, %	Kw, %	МОД, мкм	Ncp, шт./см²	Kvp, %	Wcp, мл/га	Kvw, %	Рэф
500	5	0	62,3	56,4	90,9	395,3	43,6	28,1	448,3	31,8	0,997
1000	5	0	66,8	61,8	93,7	389,2	47,6	22,5	462,4	29,5	0,999
1300	5	0	60,5	65,1	94,8	380,2	49,9	17,2	463,4	29,0	1,000

1500	5	0	61,5	71,6	97,1	363,8	54,1	12,4	467,5	31,5	1,000
1600	5,2	0,8	55,3	78,3	98,6	365,5	59,7	23,0	508,0	40,8	1,000
1800	14,4	2	60,5	45,1	89,7	321,4	33,9	11,6	441,2	20,4	0,985
2000	24	2	48,8	25,1	78,2	315,7	19,37	8,77	401,4	13,0	0,460

Из представленных табличных данных показателей опрыскивания с отмеченными ранее параметрами для режима снижения и набора высоты самолета можно отметить достаточно очевидные изменения показателей опрыскивания для больших высот выпуска жидкости, в частности, уменьшение доли осевшей жидкости (количество капель K_p и объем препарата K_w) и ее дисперсности (медианно-объемный диаметр (МОД)), а также снижению при обработке с заданной шириной захвата (30 м) средних величин плотности капель (N_{cp}) и дозировки препарата (W_{cp}) и их равномерности (K_{vp} , K_{vw}), что связано с падением показателей составляющих и общей биологической эффективности (Рэф).

Результаты компьютерного моделирования процессов и показателей авиационного опрыскивания на характерных и нетрадиционных режимах внесения рабочих жидкостей дают возможность совершенствования технологий АХР с использованием вышеназванных приемов и интегральных показателей (критериев) эффективности таких работ.

В качестве критерия эффективности АХР при обработке разными i -ми способами некоторой культуры на конечной площади S может быть использован показатель в виде ([2]):

$$K_s = \frac{E_s}{Z_s} = \frac{\sum_i E_i}{\sum_i Z_i} = \bar{Z}_i K_i, \quad (1)$$

где E_s, Z_s – общий эффект и затраты на обработку площади $S = \sum_i F_i$, руб.;

E_i, Z_i – эффект и затраты обработки i -ым способом площади F_i , руб.;

$\bar{Z}_i = Z_i / \sum_i Z_i$ – относительные затраты по i -му способу обработки;

$K_i = E_i / Z_i$ – критерия эффективности i -го способа обработки.

Критерий эффективности i -го способа в (1) с учетом положений [2] для удобства анализа может быть представлен эквивалентными выражениями как

$$K_i = \frac{P_{эф} \cdot \bar{E}_{oi} \cdot F_i}{Z_i} = \frac{\bar{E}_{1i} \cdot \Pi_{ti}}{Z_{ti}} = \frac{\bar{E}_{1i}}{\bar{Z}_{1i}}, \quad (2)$$

где \bar{E}_{oi} – базовый удельный экономический эффект обработки заданным препаратом соответствующей культуры в средних условиях, руб./га;

Π_{ti}, Z_{ti} – приведенные ко времени обработки T_i площади F_i производительность и себестоимость i -го способа, га/ч. и руб./ч.;

$\bar{E}_{1i}, \bar{Z}_{1i}$ – расчетный удельный экономический эффект и себестоимость обработки i -ым способом, руб./га.

В табл. 3 для примера выявления рациональных технологических приемов производства АХР с использованием компьютерного моделирования их процессов и критерияльных форм (1)–(2) для средних величин их параметров [18–20 и др.] представлены отдельные интегральные показатели по опрыскиванию самолетом Ан-2 с нормой 50 л/га типового поля с длиной 2200 м и площадью при соотношении сторон 1: 2 около 240 га при наличии на его границах препятствий со средней высотой 14 м. Для этого случая при традиционной схеме производства АХР (базовый вариант № 0) длина гона ($L_{вн}$) составляет примерно 1500 м при общей длине участка на режимах захода на гон и выхода из него около 700 м, т.е. на рассматри-

ваемом поле по базовой схеме ВС не обрабатывается почти треть его площади, которую заказчик обработок вынужден дополнительно обрабатывать с применением, например, наземных опрыскивателей.

В представленной таблице для каждого последующего варианта (№ 1, 2, 3...) последовательно увеличивались удаления начала и окончания опрыскивания от соответствующих точек базового гона (с уменьшением расстояния до препятствий на входе (X+) и выходе (X-) и росте высот начала и окончания опрыскивания (H+, H-)) до совпадения с границами участка (№ 8)) с естественным увеличением при этом Lвн и сокращением нуждающихся в дополнительной наземной обработке площадей в пределах рассматриваемого поля.

Таблица 3

Расчетные показатели защитной обработки характерного участка с граничными препятствиями высотой 14 м самолетом Ан-2 (V =150 км/ч, закрылки 5°, Нр = 5 м, Н = 50 л/га) при различных вариантах включения и выключения опрыскивателя в пределах концевых зон

№ №	Показатели авиационной обработки											Общие показатели			
	X+/H+, м	X-/H-, м	Lвн, м	$P_{эф}$	$\Pi_{та}$, га/л.ч	Zта, р/га	Cга, п/га	\bar{E}_{1a} , п/га	K_a	E_a , т. п.	ΔE_a , т. п.	E_s , т. п.	Zs, т. п.	ΔE_s , т. п.	K_s
0	300/5	-440/5	1500	0,962	83,7	358	1743	2964	1,700	489	201	707	429	278	1,649
1	250/6,4	-350/7,2	1613	0,965	82,2	365	1750	2971	1,698	527	217	710	429	281	1,655
2	250/6,4	-300/9,6	1663	0,966	84,7	354	1739	2974	1,710	544	226	711	427	285	1,668
3	250/6,4	-250/12,0	1713	0,966	87,1	345	1730	2976	1,721	561	235	713	424	288	1,680
4	200/9,6	-200/14,4	1800	0,967	91,4	328	1713	2978	1,738	590	250	714	420	294	1,701
5	150/13,2	-150/16,8	1900	0,956	96,2	312	1697	2945	1,736	616	261	709	415	294	1,708
6	100/16,8	-100/19,2	2000	0,943	101,0	297	1682	2906	1,728	639	269	702	410	291	1,710
7	50/20,4	-50/21,6	2100	0,929	92,7	323	1708	2862	1,675	661	267	692	415	278	1,669
8	0/24	0/24	2200	0,904	96,8	310	1695	2784	1,643	674	264	674	410	264	1,643

Как видно из представленных данных, для авиационного способа обработки минимальные величины \bar{E}_{1a} и K_a соответствуют вариантам № 7 и 8 (начало и окончание опрыскивание в непосредственной близости от препятствий на границе поля), что обусловлено в основном падением интегральной биологической эффективности $P_{эф}$, которая не компенсируется связанным с увеличением Lвн общим ростом летной производительности $\Pi_{та}$ и уменьшением себестоимости использования самолета Zта при авиационной обработке. В свою очередь, максимальные значения этих показателей характерны для варианта № 4 при удалениях начала и окончания режима обработки примерно 200 м от границ поля. Примечательно, что расчетные величины K_a для вариантов с началом и окончанием опрыскивания, приближенным к границам участка (№ 3-6), ощутимо превосходят значения для базового варианта и являются более предпочтительными. Этот вывод подтверждает и сравнение абсолютных величин получаемого заказчиком АХР эффекта (E_a) и прибыли ($\Delta E_a = E_a - Z_a$) по всей обработанной авиационным способом площади поля. Характерно также, что максимальная величина эффекта авиационной обработки E_a соответствует варианту № 8 с началом и окончанием обработки на границе участка (за счет обработки всего участка со сниженной приведенной $P_{эф}$), а прибыли ΔE_a - № 6 для удалений от границ участка в пределах 100 м, т.е. выбор рациональной технологической схемы обработок не однозначен и обусловлен приоритетами выполнения этих работ.

Приоритеты заказчика АХР характеризуют, в частности, общие величины эффекта E_s и прибыли ΔE_s обработки всего поля, на котором дополнительно с использованием имеющейся наземной техники может быть выполнена обработка

зон, которые не были охвачены авиационным опрыскиванием. Как видно из таблицы 3, наивысший приоритет по этим показателям для заказчика имеют варианты № 4 и 5 (удаления от границ в пределах 150–200 м), а по эффективности (K_S) - № 6 при удалении 100 м.

Проведенный с использованием полученных в процессе компьютерного моделирования процессов АХР данных расчетно-теоретический комплексный анализ вариантов и схем организации обработок участков с препятствиями на границах для характерных производственных условий с применением развернутых технико-экономических оценок их результатов для заказчиков и исполнителей АХР позволил констатировать, что для повышения эффективности авиационного опрыскивания участков, ограниченных препятствиями, технически возможно и экономически целесообразно использовать схему проведения работ, предусматривающую начало и окончание обработки таких участков на этапе снижения и набора высоты при удалениях от препятствий, соответствующих 1–2 с полета ВС (для самолета Ан-2 на удалениях 50–150 м при высоте полета до 20 м), что обеспечивает рост производительности авиационного опрыскивания до 10–15 %, уменьшение себестоимости обработок на 3–5 % и увеличения экономической эффективности на 2–3 % при росте их суммарного эффекта на 6–8 %.

Заключение. Сформированные и апробированные в процессе исследований методические подходы, математические модели и расчетно-программный комплекс моделирования процессов и показателей авиационного опрыскивания обеспечивает рост системности решения при решении актуальных научно-практических задач выполнения АХР, в т.ч. по совершенствованию технологий таких работ в конкретных условиях их производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение авиации в сельском и лесном хозяйстве / под ред. В.А. Назарова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 312 с.
2. *Асовский В.П.* Теория и практика авиационного распределения веществ. – М.: Воздушный транспорт, 2008. – 580 с.
3. *Логачев Ю.Г.* О путях повышения эффективности авиационной обработки // Механика процессов авиационного опрыскивания и рассеивания сыпучих веществ: Сб. науч. тр. – № 3. – Вып. 219. – Рига: РКИИГА, 1971. – С. 3-16.
4. *Деревянюк В.С.* Влияние аэродинамических возмущений на процессы авиационного опыливания и опрыскивания. – М.: Транспорт, 1974. – 72 с.
5. *Дудник В.В.* Уменьшение вредного воздействия на окружающую среду при внесении химических веществ с сельскохозяйственных вертолетов: дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону: РД ГСХМ, 1998. – 154 с.
6. *Сулин М.А.* Землеустройство. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 448 с.
7. Рекомендации по разработке проектов внутрихозяйственного землеустройства на эколого-ландшафтной основе, РОСЗЕМКАДАСТР. Институт РосНИИземпроект. – М., 2000. – 284 с.
8. *Парамонов Е.Г., Симоненко А.П.* Основы агролесомелиорации: учеб. пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. – 224 с.
9. Руководство по авиационно-химическим работам гражданской авиации СССР. – М.: Воздушный транспорт, 1984. – 63 с.
10. Методические рекомендации по инвентаризации сельхозугодий на их пригодность к обработке самолетами и вертолетами при выполнении авиационно-химических работ. – М.: МГА, 1980. – 13 с.
11. *Аубакиров Т.О., Желанников А.И., Иванов П.Е., Нишит М.И.* Спутные следы и их воздействие на летательный аппарат. Моделирование на ЭВМ. – Алматы, ТОО "Мария", 1999. – 278 с.
12. *Белоцерковский Ал.С., Гиневский А.С., Погребная Т.В., Шитлов С.Д.* Моделирование дальнего вихревого следа магистральных самолетов при взлете и посадке // Успехи механики. – 2003. – № 4. – С. 106-127.

13. Гиневский А.С., Желанников А.И. Вихревые следы самолетов. – М.: Физматлит, 2008. – 170 с.
14. Кузьменко А.С. Использование компьютерного моделирования процессов опрыскивания в задачах повышения эффективности авиационно-химических работ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 89-104.
15. Радченко И.В., Крамчанинов В.П., Дубринский В.П. Самолет Ан-2. – М.: Транспорт, 1969. – 440 с.
16. Руководство по летной эксплуатации самолета Ан-2. – М.: Воздушный транспорт, 1984. – 199 с.
17. Указания по технологии авиационно - химических работ в сельском и лесном хозяйстве СССР. – М.: Воздушный транспорт, 1982. – 120 с.
18. Дидио Ж.Р., Фишер Л.К., Лерх М. и др. Техника и технология безопасного применения средств защиты растений. – М.: Агропромиздат, 1991. – 186 с.
19. Попов С.Я., Дорожкина Л.А., Калинин В.А. Основы химической защиты растений / под ред. профессора С.Я. Попова. – М.: Арт-Лион, 2003. – 208 с.
20. Зинченко В.А. Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность. – М.: КолосС, 2005. – 232 с.

REFERENCES

1. Primenenie aviatsii v sel'skom i lesnom khozyaystve [The use of aviation in agriculture and forestry], ed. by V.A. Nazarova. 2nd ed., reprint. and additional. Moscow: Transport, 1975, 312 p.
2. Asovskiy V.P. Teoriya i praktika aviatsionnogo raspredeleniya veshchestv [Theory and practice of aviation distribution of substances]. Moscow: Vozdushnyy transport, 2008, 580 p.
3. Logachev Yu.G. O putyakh povysheniya effektivnosti aviatsionnoy obrabotki [On ways to improve the efficiency of aviation processing], *Mekhanika protsessov aviatsionnoy opryskivaniya i rasseivaniya syuchikh veshchestv: Sb. nauch. tr.* [Mechanics of the processes of aircraft spraying and dispersion of bulk substances. Collection of scientific papers], No. 3, Issue 219. Riga: RKIIGA, 1971, pp. 3-16.
4. Derevyanko V.S. Vliyanie aerodinamicheskikh vozmushcheniy na protsessy aviatsionnogo opylivaniya i opryskivaniya [Influence of aerodynamic disturbances on the processes of aircraft pollination and spraying]. Moscow: Transport, 1974, 72 p.
5. Dudnik V.V. Umen'shenie vrednogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu pri vnesenii khimicheskikh veshchestv s sel'skokhozyaystvennykh vertoletov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Reduction of harmful effects on the environment when applying chemicals from agricultural heli-copters: cand. of eng. sc. diss.]. Rostov-on-Don: RD GSKHM, 1998, 154 p.
6. Sulin M.A. Zemleustroystvo [Land management]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2005, 448 p.
7. Rekomendatsii po razrabotke proektov vnutrikhozyaystvennogo zemleustroystva na ekologo-landshaftnoy osnove, ROSZEMKADASTR. Institut RosNIizemproekt [Recommendations for the development of projects of on-farm land management on an ecological and landscape basis, ROSZEMKADASTR Institute of Rosnizemproekt]. Moscow, 2000, 284 p.
8. Paramonov E.G., Simonenko A.P. Osnovy agrolesomelioratsii: ucheb. posobie [Fundamentals of agroforestry: a textbook]. Barnaul: Izd-vo AGAU, 2007, 224 p.
9. Rukovodstvo po aviatsionno-khimicheskim rabotam grazhdanskoy aviatsii SSSR [Manual on aerial - chemical works of civil aviation of the USSR]. Moscow: Vozdushnyy transport, 1984, 63 p.
10. Metodicheskie rekomendatsii po inventarizatsii sel'khozugodiy na ikh prigodnost' k obrabotke samoletami i vertoletami pri vypolnenii aviatsionno-khimicheskikh rabot [Methodical recommendations for the inventory of agricultural lands for their suitability for processing by airplanes and helicopters when performing aviation-chemical works]. Moscow: MGA, 1980, 13 p.
11. Aubakirov T.O., Zhelannikov A.I., Ivanov P.E., Nisht M.I. Sputnye sledy i ikh vozdeystvie na letatel'nyy apparat. Modelirovanie na EVM [Vortex tracks and their effect on aircraft. Computer simulation]. Almaty, TOO "Mariya", 1999, 278 p.
12. Belotserkovskiy Al.S., Ginevskiy A.S., Pogrebnaya T.V., SHipilov S.D. Modelirovanie dal'nego vikhrevoogo sleda magistral'nykh samoletov pri vzlete i posadke [Simulation of the far vortex trail of long-haul aircraft during takeoff and landing], *Uspekhi mekhaniki* [Successes of mechanics], 2003, No. 4, pp. 106-127.

13. *Ginevskiy A.S., Zhelannikov A.I. Vikhrevye sledy samoletov [Vortex traces of aircraft].* Moscow: Fizmatlit, 2008, 170 p.
14. *Kuz'menko A.S. Ispol'zovanie komp'yuternogo modelirovaniya protsessov opryskivaniya v zadachakh povysheniya effektivnosti aviatsionno-khimicheskikh rabot [The use of computer modeling of spraying processes in the tasks of increasing the efficiency of aviation chemical works],* *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences],* 2019, No. 2 (204), pp. 89-104.
15. *Radchenko I.V., Kramchaninov V.P., Dubrinskiy V.P. Samolet An-2 [Plane An-2].* Moscow: Transport, 1969, 440 p.
16. *Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii samoleta An-2 [Manual for the flight operation of the An-2 aircraft].* Moscow: Vozdushnyy transport, 1984, 199 p.
17. *Ukazaniya po tekhnologii aviatsionno - khimicheskikh rabot v sel'skom i lesnom khozyaystve SSSR [Instructions on the technology of aerial - chemical works in agriculture and forestry of the USSR].* Moscow: Vozdushnyy transport, 1982, 120 p.
18. *Didio Zh.R., Fisher L.K., Lerkh M. i dr. Tekhnika i tekhnologiya bezopasnogo primeneniya sredstv zashchity rasteniy [Technique and technology for the safe use of plant protection products].* Moscow: Agropromizdat, 1991, 186 p.
19. *Popov S.Ya., Dorozhkina L.A., Kalinin V.A. Osnovy khimicheskoy zashchity rasteniy [Fundamentals of chemical plant protection],* ed. by professor S.Ya. Popova. Moscow: Art-Lion, 2003, 208 p.
20. *Zinchenko V.A. Khimicheskaya zashchita rasteniy: sredstva, tekhnologiya i ekologicheskaya bezopasnost' [Chemical plant protection: means, technology and environmental safety].* Moscow: KolosS, 2005, 232 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Панатов.

Асовский Валерий Павлович – Акционерное общество научно-производственная компания «ПАНХ» (АО НПК «ПАНХ»); e-mail: vasov63@mail.ru; г. Краснодар, Россия; д.т.н.; ученый секретарь.

Кузьменко Алла Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: akuzm@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043437260; кафедра летательных аппаратов; к.т.н.; доцент.

Asovsky Valery Pavlovich – Joint Stock Company Scientific and Production Company «PANH» (JSC NPK «PANH»); e-mail: vasov63@mail.ru; Krasnodar, Russia; dr. of eng. sc.; scientific secretary.

Kuzmenko Alla Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: akuzm@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043437260; the department of aircraft; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-29-39

Д.В. Беляев, Д.Е. Губарев, К.Е. Румянцев

СЛУЧАЙНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА С ОСЦИЛЛЯЦИЯМИ НА ВЕРШИНЕ МНОГОПороГОВЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЯМИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В системах автоматического измерения длительности видеоимпульсов используются различные устройства усиления и формирования импульсов нормированного уровня, длительность которых равна длительности входных сигналов. Грубое измерение длительности видеоимпульсов может производиться однопороговыми измерителями. Более точными являются многопороговые измерители и измерители с плавающим порогом. Измерители длительности импульсов нашли широкое применение в аппаратуре радиоэлектронной борьбы, в измерительной технике. Вариация формы электрических сигналов не позволяет применить единственный метод измерения, наилучший для всех форм, поэтому продолжается поиск технических решений, удовлетворяющих противоречивым требованиям: широкий диапазон длительностей и скважностей. Целью работы является провести матема-