

Определение рациональной массы полезной нагрузки сельскохозяйственного самолета

А.Г.Шнырёв

В статье рассматриваются вопросы выбора рациональной грузоподъемности сельскохозяйственного самолета на основе анализа влияния погодных условий на возможное время работ.

В условиях современной экономики снижение сроков окупаемости затрат на приобретение новой техники играет важное значение.

При организации авиационно-химических работ (АХР) это особенно значимо, так как АХР имеют ярко выраженный сезонный характер и для повышения эффективности их выполнения важно максимально увеличивать объем работ.

Исходя из того, что оплата за АХР традиционно производится пропорционально обработанной площади и полный цикл хозяйственной деятельности в сельском хозяйстве равен году, годовой размер обработанной площади принят в качестве основного критерия, влияющего на экономическую эффективность АХР.

Общую площадь, обработанную за год, можно представить в виде зависимости:

$S = q_{\text{ч}} t_{\text{год}}$, где $q_{\text{ч}}$ - часовая производительность, гектар в час, а годовое полетное время $t_{\text{год}}$ - (количество отработанных часов за год).

В настоящей статье будут рассмотрены возможности повышения годового полетного времени ($t_{\text{год}}$) и вопросы выбора рациональной грузоподъемности сельхозсамолета.

Увеличение годового времени работ

Для увеличения общего годового времени работ необходимо, чтобы самолет мог производить работы при максимально широком диапазоне внешних условий.

Возможность проведения АХР в основном ограничивается опасностью сноса распыляемого вещества на объекты, не предусмотренные для обработки, а также необходимостью обеспечения приемлемой точности внесения распределения веществ.

Величину сноса определяют размер частицы (капли) вещества, высота полета, а также метеорологические параметры (погодные условия): скорость ветра, температура и относительная влажность атмосферы. При демонстрации методики для упрощения не будем учитывать влияние

влажности и температуры воздуха на дистанцию сноса частиц. Подробно это влияние описано в [4].

Частицы большего размера быстрее оседают на обрабатываемые растения, медленнее испаряются, что снижает влияние метеоусловий и опасность попадания вносимого препарата на непредусмотренные объекты. Применение частиц увеличенного размера позволяет вести работы при более широком диапазоне погодных условий.

В качестве параметра, характеризующего опасность попадания вносимого препараты на непредусмотренные объекты, определено расстояние сноса (горизонтальной составляющей полета) L_q . Чрезмерное увеличение защитной полосы, ширина которой должна превышать длину сноса, снизит эффективность применения АХР, что может привести к выбору заказчиком методов распределения веществ с наземного транспорта.

По формуле [4] оценим длину, пройденную частицей размером d_q , распыленной с высоты H :

$$L_q = \frac{206,2HV_{ветра}}{d_q - 46,4} \text{ м}, \quad (1)$$

На рис.1 показана зависимость длины пути L_q , пройденного частицей с высоты 3м при скорости ветра 1,5 м/с от размера частицы, полученная при обработке данных [4]. Очевидно, что для работы при ширине захвата в 20-30м снос частиц даже на величину 10 метров не обеспечит необходимой точности внесения.

Для определения зависимости между допустимой скоростью ветра и размером частицы при наиболее характерных условиях АХР необходимо задаться допустимой величиной сноса, которая зависит от требований по безопасности и точности внесения. При этом необходимо произвести расчеты для минимального и среднего размера частиц и, соответственно, допустимыми величинами сноса исходя из, соответственно, требований безопасности и точности внесения. Для препаратов не представляющих особой опасности при попадании на близкорасположенные к месту обработки объекты, расчеты для минимального размера частиц можно не производить.

Применив ограничение дистанции сноса вещества в 10м, для указанных условий получим из графика на рис.1, минимально допустимый размер частиц вносимого вещества 120 мкм. Это ограничение относится к "основным", рабочим частицам, оказывающим целевое воздействие на обрабатываемый объект.

Другое ограничение на максимальный снос наиболее мелких частиц в спектре распыления реализуется исходя из требований безопасности объектов, попадание на которые распыляемых веществ может нанести им существенный вред. Расстояние для таких объектов примем равным 200м. Размер частиц, соответствующих этому ограничению составит 30 мкм.

В результате, для обеспечения установленной точности и безопасности внесения необходимо обеспечить размер основной массы частиц не менее 120мкм, а минимальный – 30мкм.

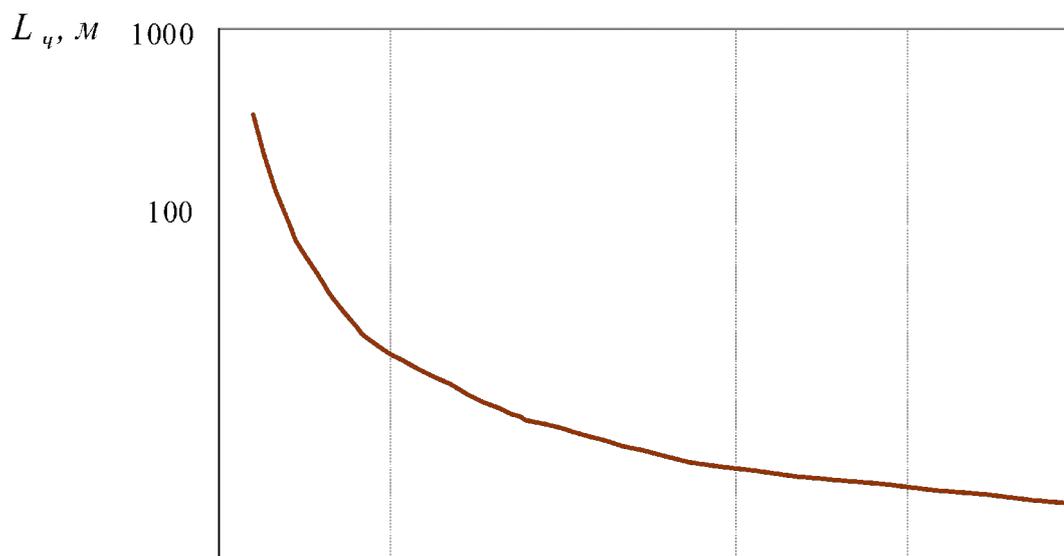


Рис. 1. Зависимость пройденного частицей пути от её размера.

Необходимо отметить, что не во всех случаях разбавление с целью увеличения капли позволяет эффективно применять препарат. Также, некоторые препараты имеют не связанные с испарением ограничения по температуре окружающего воздуха. Поэтому, рассматривая задачу увеличения годового времени работ, необходимо рассматривать влияние всех факторов на целесообразность увеличения размера капли для каждого вида агрохимических работ.

С учетом вышесказанного и данных [4] можно определить размер частицы, которому будет соответствовать допустимая скорость ветра.

Зависимость допустимой скорости ветра (V_g) от размера частицы при ширине защитной полосы (расстоянии от места внесения до опасного объекта) 200м и плотности покрытия 10см^{-2} [4] стр.218 отражена на рис.2.

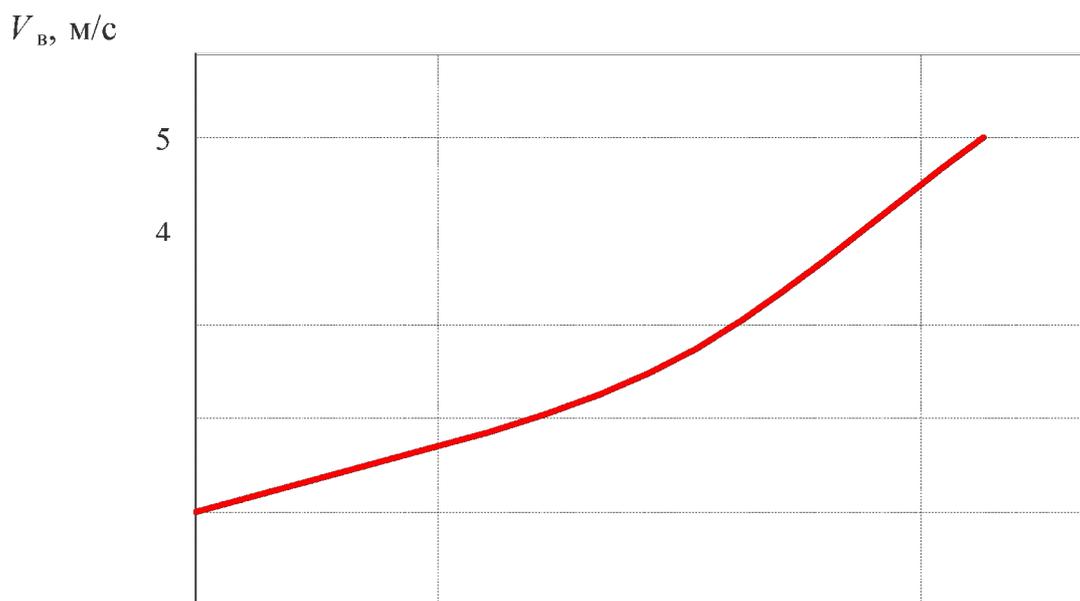


Рис. 2. Зависимость допустимой скорости ветра от размера частицы.

Метеоусловия

При использовании полученной выше зависимости допустимой силы ветра от размера частиц для определения рациональной грузоподъемности необходимо знать ход метеорологических параметров в течение рассматриваемого периода.

Обработку метеоданных удобно выполнять с помощью структурированной базы данных, делая SQL запросы. С этой целью автором была разработана программа "Метео", в основу которой положены процедуры по формированию SQL запросов и оценке их результатов. Данные о ходе метеорологических параметров для этой программы взяты из "Архива погодных условий", который разрабатывают и ведут [Гидрометцентр](#) Российской Федерации и [Отдел технологий спутникового мониторинга](#) ИКИ РАН, при поддержке [Российского фонда фундаментальных исследований](#) (проект 01-07-90172).

Данные о круглогодичном ходе метеорологических параметров в Волгоградской, Новосибирской, Ростовской и Рязанской областях соответствующим образом отфильтрованы, аппроксимированы и сконвертированы в базу данных в удобном для обработки формате.

Для примера, полученные на метеостанции Ростова-на-Дону данные за двое суток отражены в таблице 1.

Таблица 1

Дата, время	скорость ветра, м/с	нижний край облаков, м	температура воздуха, °С	относительная влажность, %	Видимость, км	код метеоявления
07-авг-04 00:00	3,0	3000	20	62	10	0
07-авг-04 03:00	3,0	3000	19	61	10	0
07-авг-04 06:00	4,0	3000	22	61	10	0
07-авг-04 09:00	6,0	1250	27	46	10	0
07-авг-04 12:00	4,0	3000	29	33	10	0
07-авг-04 15:00	3,0	3000	29	27	10	0
07-авг-04 18:00	1,0	3000	24	49	10	0
07-авг-04 21:00	2,0	3000	24	37	10	0
08-авг-04 00:00	2,0	3000	21	51	10	0
08-авг-04 03:00	3,0	3000	21	63	10	0
08-авг-04 06:00	4,0	1250	21	66	10	2
08-авг-04 09:00	5,0	1250	26	48	10	0
08-авг-04 12:00	4,0	1250	28	32	10	95
08-авг-04 15:00	2,0	1250	26	39	10	2
08-авг-04 18:00	1,0	1250	24	49	10	0
08-авг-04 21:00	4,0	1250	24	44	10	85
09-авг-04 00:00	1,0	1250	20	75	10	25

Коды указанных в таблице метеоявлений:

0 – метеоявления отсутствуют (нет изменений);

2 – облачность, без изменений;

25 – ливневый дождь (в прошлый час);

85 – ливневый дождь;

95 – гроза.

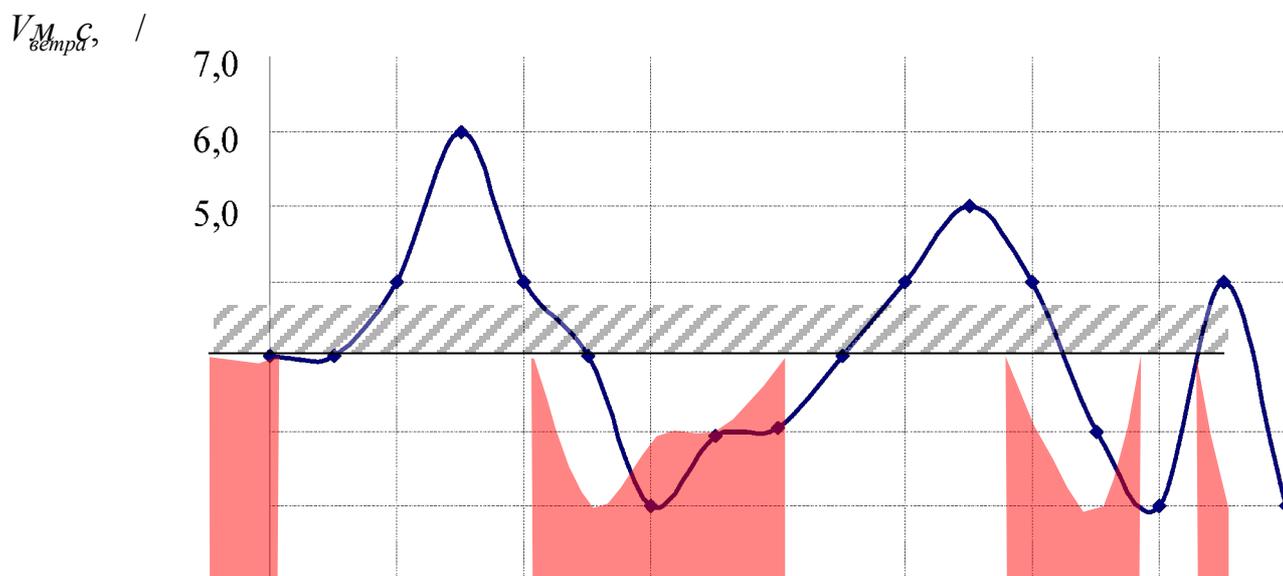


Рис. 3 Определение доступного периода работ в зависимости от допустимой скорости ветра

Программа разработана таким образом, что может обрабатывать метеоданные принятого формата для любых регионов. Для примера, на рис.3 отражен аппроксимированный ход скорости ветра, полученный на основе данных, приведенных в таблице 1.

На рис 3 отражено допустимое время работ в зависимости от допустимой скорости ветра без учета влияния опасных для полета метеоявлений и освещенности. Очевидно, что при учете указанных параметров допустимое время работ станет еще меньше, а возможность выполнять работы при более жестких метеоусловиях еще значимее.

Для определения грузоподъемности удобнее оперировать не размером частицы, а удельным расходом вещества, отнесенным к обрабатываемой площади.

Зависимость между размером частицы и удельным расходом раствора на обрабатываемую площадь определяется по формуле [4]:

$$d_u = 267 \sqrt[3]{\frac{1-\varphi}{\xi}} \sqrt[3]{q_{za}},$$

преобразовав которую получим:

$$q_{za} = \frac{\xi}{1-\varphi} \left(\frac{d_u}{267} \right)^3, \quad (2)$$

где ξ - доля потерь, φ - плотность покрытия, $см^{-2}$.

Величины и ξ могут меняться для различных препаратов, типов аппаратуры для распределения веществ и размера частиц.

Плотность покрытия частицами φ распределяемого вещества определяется агротехническими требованиями и колеблется в диапазоне 10-70 $см^{-2}$ в зависимости от агротехнических требований. В технологических целях, в том числе для увеличения размера капли, в большинстве случаев допускается его разбавление жидкостями (водой, дизтопливом и т.д.).

В общем случае доля потерь зависит от диаметра частицы и характеристик аппаратуры для распыления, но такую зависимость можно установить только экспериментальным путем.

При использовании формулы (2) необходимо учитывать то обстоятельство, что существующие устройства для распределения веществ распыляют частицы не точно заданного размера, а в определенном диапазоне. Соотношение минимального размера частиц, определяющего величину сноса, используемую при определении полосы безопасности, к усредненному значению частиц, определяющих расход вещества на единицу площади, и обусловит критерий, определяющий величину сноса.

Исходя из агротехнических требований к внесению определенного вещества, указанного для примера в первой ячейке таблицы 2 и задав период для внесения вещества, можно определить допустимые метеорологические условия при разных значениях q_{ca} .

Используя определенные выше параметры в качестве ограничений, при условии отсутствия опасных для проведения полетов метеорологических явлений, проверим с помощью программы "Метео" наличие возможности выполнения АХР в каждый час и просуммируем время, при котором метеоусловия будут позволять выполнять АХР.

Обобщенный результат можно отразить в таблице:

Таблица 2

Наименование препарата: "....." Площадь внесения в регионе "....." – 6300 Га Период внесения: с 01.06. по 20.06 (320 часов днем, 480 ночью) Ограничения: - макс. температура применения – 32°C. Плотность покрытия – 30 см ²		
Размер частицы, мкм	Допустимое время работ, час	% допустимого времени работ от возможного за период внесения
50	82	23
100	185	57
150	285	89
200	298	93

Приведенный результат, который относится к применению одного вещества в одном регионе, преобразован с помощью зависимости (2) при $\varphi = 0,3$, $\xi = 50$ и показан на графике на рис.4.

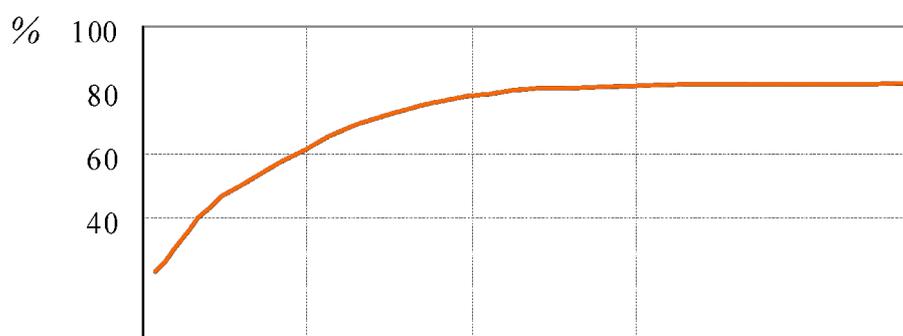


Рис. 4. Зависимость относительного допустимого времени для АХР от q_{ca} .

Из приведенного на рис. 4 графика следует, что применение разбавления растворов позволяет значительно увеличивает годовое время работы.

С другой стороны, это вызывает необходимость увеличения размера бака для распределяемого вещества и повышения грузоподъемности самолета, что в свою очередь увеличивает себестоимость работ.

Рациональный вес полезной нагрузки

При выборе веса полезной нагрузки необходимо учесть влияние множества требований, определенных исходя из условий эксплуатации и агротехники, и определить такую грузоподъемность сельхозсамолета, которая позволит проводить авиахимработы с наибольшей экономической эффективностью. Для этого необходимо найти баланс между достаточной для выполнения различных операций грузоподъемностью и желанием иметь самолет минимального размера для снижения себестоимости его эксплуатации. Определение зависимости себестоимости эксплуатации сельхозсамолета от его взлетного веса представляет собой достаточно сложную задачу в сфере экономики и не входит в объем настоящей работы.

Для определения величины веса полезной нагрузки (G_{nn}) можно воспользоваться зависимостью:

$$G_{nn} = S_{цикла} q_{га}, \text{ кг}, \quad (3)$$

где $q_{га}$ - расход вещества на единицу площади (Га), $S_{цикла}$ - площадь, обработанная за один цикл (полет).

Площадь, обработанная за один вылет (производственный цикл), определяется следующим образом:

$$S_{цикла} = \frac{n_{гонов} L_{гона} b_{гона}}{10000}, \text{ Га}, \quad (4)$$

где: $b_{гона}$, $L_{гона}$, $n_{гонов}$ - ширина, длина гона, в м, и число гонов соответственно.

Ширина гона в основном зависит от размаха крыла самолета, типа и регулировки установленной аппаратуры, характеристик спутного следа самолета, высоты его полета. Для определения рациональной грузоподъемности примем ее постоянной и равной 25м, как наиболее характерной при расчетах АХР. Количество гонов при достаточной грузоподъемности самолета (объеме его бака для распределяемого вещества) ограничивается по соображениям утомляемости экипажа. Это ограничение составляет 30 гонов за один полет [3]. Возможно, по результатам дополнительных исследований, с учетом реального влияния характеристик конкретного самолета

на утомляемость экипажа, применения устройств автоматизации пилотирования, этот параметр может быть пересмотрен. Длина гона определяется конфигурацией полей и для расчета предлагается использовать среднестатистическую длину для выбранного региона.

Исходя из [4], для расчетов первого приближения, можно принять длину гона равной 1000 м. Однако при более точных расчетах необходимо учитывать, что для каждого региона эта характеристика принимает различные значения.

Для иллюстрации график на рис.4 преобразован с помощью зависимости (3) при $S\Gamma a_{цикла} = 72$.

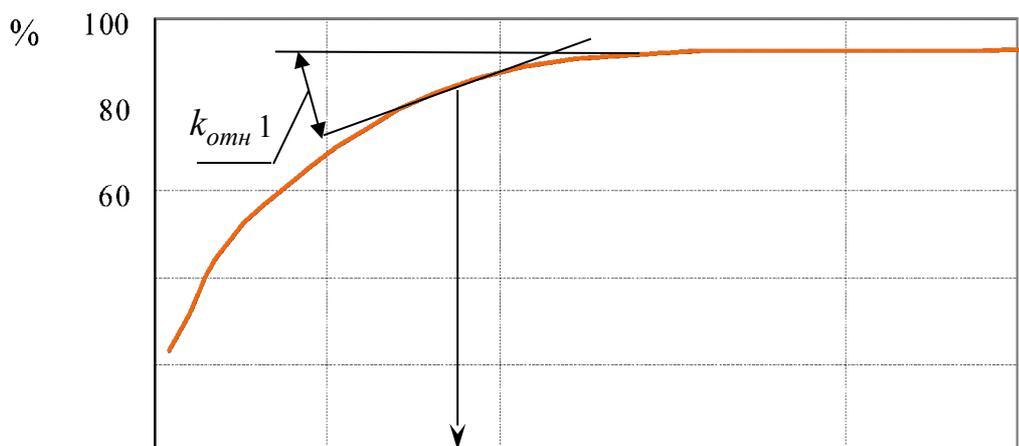


Рис. 5. Зависимость степени использования располагаемого времени работы от грузоподъемности самолета G_{mn} .

Используя график на рис.5, можно определить диапазон рациональной грузоподъемности для определенного вещества, региональных кадастровых и климатических условий. Для этого необходимо задать допустимый градиент наклона кривой, выражаемый как $k_{отн}$ (для примера использован 1:2).

Точное значение этого коэффициента можно определить с помощью экономических оценок влияния повышения производительности и себестоимости работ на общую экономическую эффективность АХР.

В настоящее время не установлено точных зависимостей стоимости авиаработ от взлетного веса самолета, при их определении осложняется необходимостью учёта не только стоимости самолета, но и таких составляющих себестоимости, как стоимость кредитов на приобретение авиационной техники (её лизинга), топлива, материалов, подготовку авиационного персонала и т.п. Определение указанных зависимостей не относится к целям данной работы.

После проведения подобных расчетов для условий различных регионов и внесения различных веществ образуется массив значений G_{nni} с соответствующими им площадями S_i (таблица 3), на которых наиболее целесообразно применять самолеты с G_{nni} .

Формирование типового ряда

При определении типового ряда парка сельхозсамолетов необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что в течение года самолет должен выполнять различные виды авиаработ, иногда в разных регионах. Предварительные расчеты показали, что в условиях различных регионов, при всевозможных видах авиаработ рациональная грузоподъемность принимать различные значения в достаточно широком диапазоне.

Очевидно, что создавать большое количество самолетов с различной грузоподъемностью нецелесообразно, так как при этом значительно возрастут расходы на разработку, производство и эксплуатацию разнотипного парка.

С другой стороны, при сужении парка возникает необходимость работы либо на самолетах избыточной грузоподъемности, что вызывает некоторое повышение себестоимости летного часа, либо с недостатком грузоподъемности, при котором могут возникнуть значительные потери производительности. Причиной снижения производительности является необходимость преждевременного возврата на дозагрузку и, как следствие, увеличение непроизводительных потерь времени на полет до аэродрома и обратно к месту работ.

Зависимость потерь производительности от недостаточности грузоподъемности, определенная при помощи программы "Траектория" приведена на рис. 6.

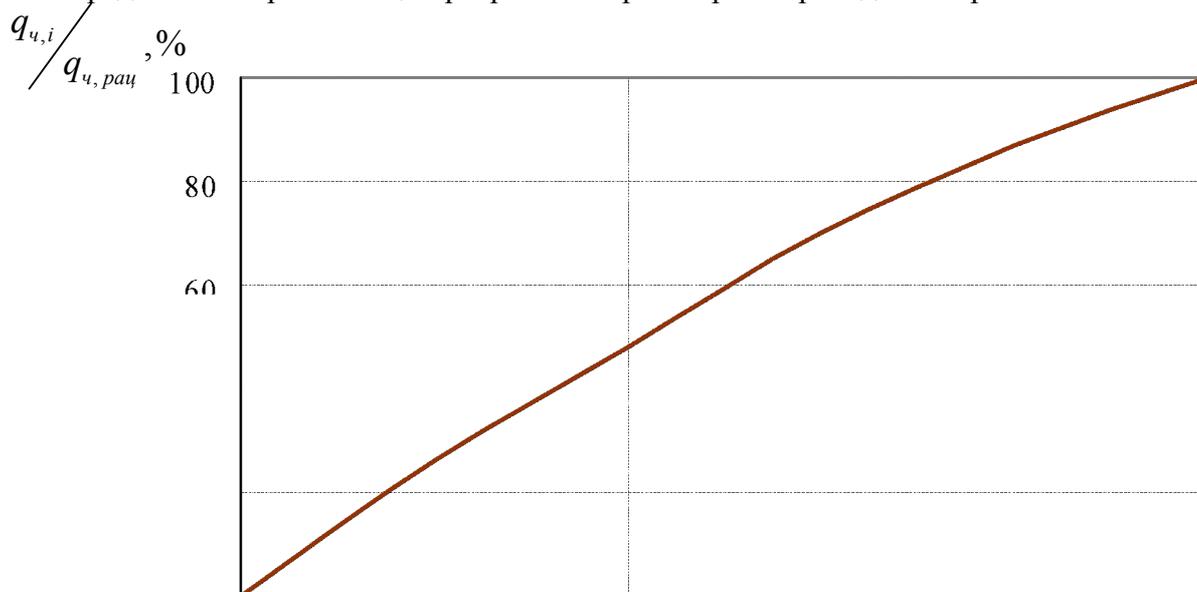


Рис. 6. Зависимость производительности от степени загрузки.

$$\frac{G_{nn,i}}{G_{nn,рац}}, \%$$

Для учета особенностей каждого региона, с помощью принципа, приведенного на рис.5, можно определить рациональную грузоподъемность самолета для выбранного географического региона при внесении различных веществ согласно агрономическим технологиям. В результате, вычисленной рациональной грузоподъемности G_{nni} будет соответствовать площадь S_i , над которой в течение года распределяется выбранное вещество в исследуемом регионе.

Результаты проведенных расчетов для изучаемых регионов и применяемых в них веществ удобно занести в таблицу:

Таблица 3

Регион 1						Регион 2						Регион ...					
Вещество А		Вещество В		Вещество ...		Вещество А		Вещество В		Вещество ...		Вещество А		Вещество В		Вещество ...	
S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}	S_i	G_{nni}

Для проведения анализа результаты из таблицы 3 с разбросом $\pm 5\% G_{nni}$ должны быть сгруппированы, S_i просуммированы в пределах групп. Типовой результат отображен на диаграмме рис.7.

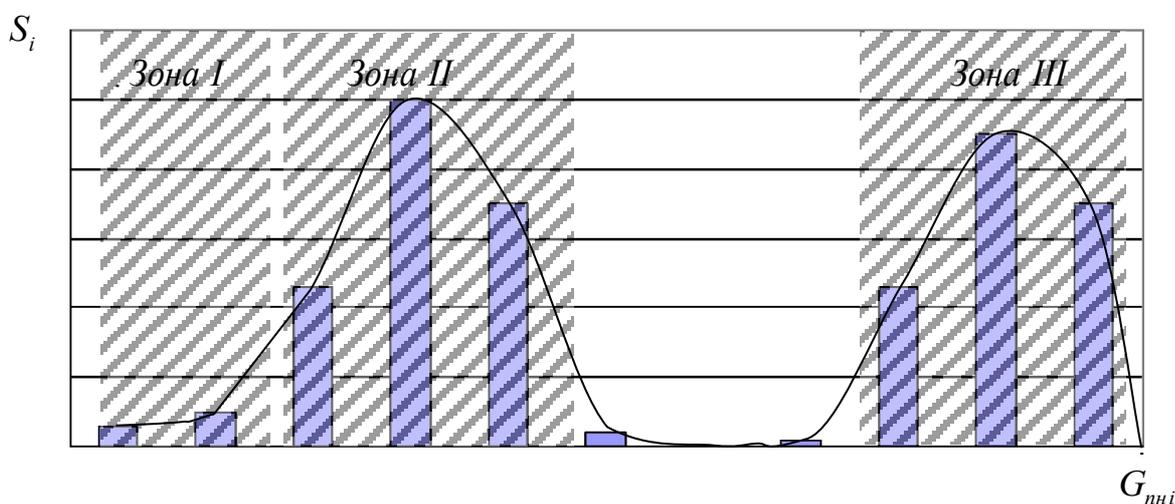


Рис. 7. Распределение объемов работ для самолетов различной грузоподъемности.

Для определения рационального диапазона допустимого "несоответствия" оптимальной и рациональной грузоподъемностей, определенных из указанных выше соображений, установлена зависимость часовой производительности от степени "недогруза" с помощью программы "Траектория". Указанная зависимость отображена на рис.6.

Для использования в качестве примера предлагается установить ширину диапазона "несоответствия" равной $\pm 20\%$, что согласно приведенной зависимости вызовет потери 10% от максимально возможной (при полной загрузке) производительности.

Множество применимых рациональных грузоподъемностей целесообразно сгруппировать по диапазонам применимости самолетов (сверхлегкий, легкий и тяжелый). При этом ширина диапазонов применимости определяется из графика на рис.7 с учетом допустимой потери производительности по причине неполной загрузки.

Далее, данные в пределах диапазонов обрабатываются с помощью статистических методов с целью определения средней величины диапазона.

В результате, полученные средние величины и определяют набор рациональных грузоподъемностей самолетов для авиационно-химических работ.

Заключение

Изложенные зависимости и методы исследования, при использовании общероссийских кадастровых и метеорологических данных, а также результатов дополнительных экономических исследований в сфере производства и эксплуатации сельскохозяйственных самолетов, позволят определить рациональную грузоподъемность модельного ряда самолетов для выполнения АХР.

Список литературы

1. Бадягин А.А., Мухамедов Ф.А. Проектирование легких самолетов. – М.: Машиностроение, 1978.- 293 с.
2. Материалы конференции в ПАНХ 2000 год. Краснодар, 2000.
3. Наставление при производстве полетов на АХР. Министерство ГА СССР, М. Воздушный транспорт, 1984 – 48 с.
4. В.П. Копычко и др. Авиация в сельском хозяйстве. Харьков, ГАЛ "Слобожанщина", 2002. – 345 с.
5. Проблемы и перспективы развития сельскохозяйственной авиации. Техническая информация ЦАГИ № 8, с. 9-24.
6. Сарымсаков Х.Г. Сельскохозяйственные самолеты. – М.: Машиностроение, 1979. - 138 с.
7. Квонтик Х.Р. Справочник пилота сельскохозяйственной авиации. - М.: Транспорт, 1991 – 422 с.

Сведения об авторе

Шнырев Андрей Геннадьевич - аспирант кафедры Проектирование самолетов Московского авиационного института (государственного технического университета).

Телефон: 155-51-56, E-mail: i@avion.ru.