



МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Л.Я.Степук, доктор технических наук, профессор

И.В.Румянцев, кандидат технических наук

ГП "БелНИИМСХ"

Н.М.Марченко, доктор технических наук, профессор

Г.И.Личман, кандидат технических наук

Москва, ВИМ

УДК 631.171:631.816

Стратегия механизации внесения удобрений

Приведены математические доказательства необходимости дифференцированного (компенсационного) внесения всех видов удобрений с учетом наличия основных элементов питания в почве на каждом конкретном участке поля. Определены основные задачи, которые необходимо решить при создании технической системы, выполняющей процесс дифференцированного внесения удобрений.

Известно, что окупаемость минеральных удобрений и химических мелиорантов в поле не соответствует прогнозируемой. Это определяется рядом факторов, главнейший из которых – неравномерное распределение удобрений между зонами питания растений. При этом считается определяющим распределение вносимых удобрений, а исходная пестрота питательных элементов по площади поля практически не принимается во внимание, хотя в ряде случаев именно эта причина является главной.

Что это так, покажем на примере химической мелиорации [1]. Сам же подход справедлив для всех элементов питания, функция отклика которых имеет максимум и последующую нисходящую ветвь, вызванную повреждением растений при чрезмерных дозах факторов роста (см., например, [2]). Несомненно, такой подход справедлив прежде всего для таких элементов питания, как азот, фосфор, калий.

Получены данные продуктивности дерново-подзолистых почв в зависимости от степени их кислотности по 1020 опытам Геосети и Агрохимслужбы Беларуси для суглинистых и супесчаных почв (см. таблицу 1, колонки 1 и 2 [3]).

Для перехода от кислотности к дозам внесения химических мелиорантов обратимся к "Инструкции по известкованию кислых почв в колхозах и госхозах Белорусской ССР" [4], где в таблице 1 содержатся данные о потребности в известковых материалах при различной кислотности почвы (см. также соответственно таблицу 1, колонка 3).

Аппроксимируем эти данные для суглинков. Средняя доза CaCO_3 (т/га), необходимая для устранения кислотности pH в этом случае

$$P_r = 18,63 - 2,52 \text{ pH}.$$

Mathematical evidences concerning the necessity of the differential (compensative) application of all types of fertilizers with consideration of basic feeding elements presence in the soil in each specific plot of the field are given. Main tasks which are to be solved by the creation of a technical system carrying out a process of the differential application of fertilizers are determined.

Потребность в известковых материалах для суглинков при $\text{pH}=4,5$

$$P_{r,4,5} = 18,63 - 2,52 \times 4,5.$$

Чтобы достичь соответствующей кислотности, необходимо внести химические мелиоранты в количестве

$$\Delta_{r,4,5} = P_{r,4,5} - P_r = 2,52 (\text{pH} - 4,5), \text{ т/га.} \quad (1)$$

Зависимость урожая (столбец 2) от вычисленных таким образом доз химмелиорантов (столбец 5) сглаживалась полиномом второго порядка вида

$$Y = a + B\Delta - C\Delta^2, \quad (2)$$

где Y – урожай в кормовых единицах, ц/га;
 a, B, C – постоянные для каждого уровня плодородия почвы размерные коэффициенты;

Δ – доза мелиоранта (действующее вещество), т/га.

Таким образом, для суглинков (табл. 1) при исходной кислотности $\text{pH}=4,5$

$$Y_{r,4,5} = 47,3 + 4,86\Delta_{r,4,5} - 0,62\Delta_{r,4,5}^2. \quad (3)$$

Максимум урожая будет при известковании до кислотности 6,06 и составит 56,81 зерновых единиц при внесении 3,92 т/га CaCO_3 .

При неравномерном внесении доза мелиоранта может рассматриваться как величина случайная. Определим математическое ожидание урожая (см. выражение 2) 1:

$$M[Y] = \bar{Y} = a + B\bar{\Delta} - C\bar{\Delta}^2 - CD_{\Delta},$$

где D_{Δ} – дисперсия распределения мелиоранта.

$$D_{\Delta} / \bar{\Delta}^2 = (W/100)^2,$$

где $W, \%$ – коэффициент вариации распределения химмелиоранта в почве.

С учетом этого

$$\bar{Y} = a + B \bar{\Delta} - C\Delta^2 [1 + (W/100)^2]. \quad (4)$$

Для суглинков с учетом выражения (3)

$$Y_{гк} = 47,3 + 4,86\Delta_{гк,5} - 0,62\Delta_{гк,5}^2 [1 - (W/100)^2].$$

Максимальный урожай при равномерности внесения ($W=0$) составляет 56,9 ц/га (рис.). Для реальных условий, когда неравномерность распределения составляет, например, 75%, излишние дозы мелиорантов в местах поля, где доза оказалась выше оптимально допустимой, урожайность резко падает. Средняя величина по всему полю в нашем случае составит 51,5 ц/га – на 5,3 ц/га меньше, чем ожидалось при равномерном известковании. В этом случае снижение дозы внесения до 2,51 т/га – на 1,41 т/га – позволяет получить при неравномерности 75% максимальный для таких условий урожай в 53,4 ц/га. Потеря урожая составит 3,4 ц/га – на 1,9 ц/га меньше, чем при первоначальной дозе CaCO_3 . Таким образом, неравномерность внесения известковых материалов вынуждает снижать средние дозы их внесения. Аналогична ситуация и для супесчаных почв.

Попробуем оценить величину исходной кислотности. Перенесем начало координат зависимости (3) функции урожая от дозы и неравномерности внесения химических мелиорантов в условную точку, где урожай

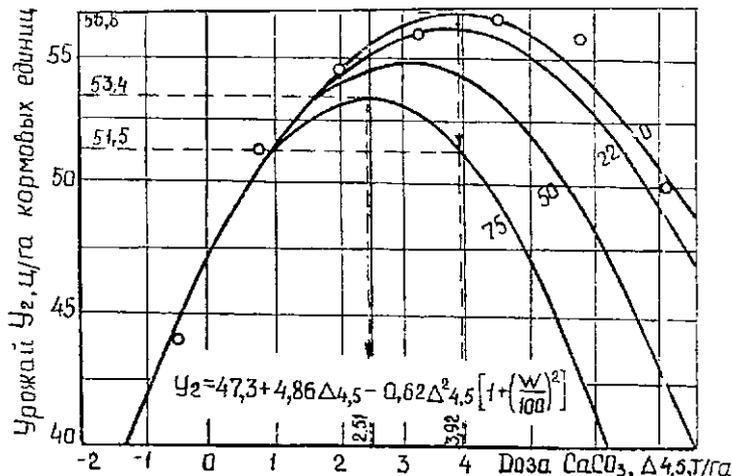


Рис. Влияние доз извести на урожай для суглинистых почв при неравномерности внесения 0,25,50 и 75% и $\text{pH}=4,5$

был бы на суглинках при равномерном распределении мелиоранта нулевой:

$$0 = 47,3 + 4,86 X_{гк} - 0,62 X_{гк}^2.$$

Откуда $X_{гк} = -5,65$ т/га.

Тогда выражение (3) примет вид:

$$Y_{гк} = 12,0 X_{гк} - 0,62 X_{гк}^2.$$

Для устранения кислотности $\text{pH}=4,5$ требуется мелиорант в количестве (см. выражение (1)) 7,29 т/га, а для

Таблица 1. Влияние доз извести на урожай для суглинистых почв

pH в KCL	Фактический урожай ($Y_{гк}$), ц/га кормовых единиц	Доза CaCO_3 для устранения кислотности ($P_{гк}$), т/га	Выравненные дозы CaCO_3 для устранения кислотности (P_r), т/га	Доза CaCO_3 для обеспечения сдвига кислотности с pH 4,50 Δ 4,5, т/га	Выравненные значения урожая ($Y_{гк}$), ц/га
4,13	-	8,0	8,22	-0,93	-
4,30	44,0	7,5	7,79	-0,50	44,71
4,50	-	-	-	0,00	-
4,63	-	7,0	6,96	0,50	-
4,80	51,4	-	-	0,76	50,62
4,88	-	6,5	6,33	0,96	-
5,13	-	6,0	5,70	1,58	-
5,30	54,5	-	-	2,02	54,58
5,38	-	5,0	5,07	2,22	-
5,50	-	-	-	2,52	55,60
5,63	-	4,5	4,44	2,84	-
5,80	55,7	-	-	3,28	56,55
5,88	-	3,5	3,81	3,47	-
6,06	-	-	-	3,92	56,81****
6,30	56,3	-	-	4,54	56,57
6,80	55,9	-	-	5,80	54,62
7,30	50,1	-	-	7,06	50,69

* – преобразованные данные кислотности ([3], табл.2, с.6)

** – данные 1020 опытов Геосети и Агротехслужбы БССР ([3], табл.2, с.6)

*** – данные инструкции по известкованию ([4], табл.1, с.7)

**** – максимум

смещения кислотности от величины в точке нулевого урожая до $pH=4,5-12,6$ т/га. Кислотность в этой условной точке нулевого урожая для суглинков $pH_{ю}=2,61$.

Аналогично 3, 4 для супесей урожай

$$Y_n = 15,8 X_n - 1,4 X_n^2.$$

Соответственно кислотность в условной точке нулевого урожая для супесей $pH_{ю}=3,06$.

Известно, что для нескольких независимых случайных величин общая дисперсия равна сумме дисперсий этих величин. Получившиеся в результате известкования почвы, взаимодействия с почвой мелиорантов, их выноса растениями, физических потерь распределение исходной кислотности в почве, которую можно рассматривать как наличие или недостаток известкового материала в отдельных точках поля, типа рабочих органов машин для внесения, их исправности, неточности вождения агрега-

та, ветра, качества мелиоранта и т.д., можно считать подчиняющейся нормальному закону, так как имеется множество влияющих на кислотность факторов примерно одного порядка значимости. Величина этой дисперсии не меньше, чем дисперсия внесения мелиоранта в предыдущем цикле известкования, так как имеет место несомненный прогресс в разработке технологий и машин для известкования, в улучшении качества распределения.

При последующем внесении мелиорантов действует также множество факторов. Причем, если средняя доза определяется потребностью, то конкретные вносимые на площадки питания растений дозы определяются множеством описанных выше факторов, поэтому общая дисперсия доз внесения после каждого известкования

$$D_{\Sigma} = D_n + D_b,$$

где D_n – исходная дисперсия кислотности в пересчете на дозы химического мелиоранта, (т/га)²;

Таблица 2. Урожай (в зерновых единицах) при различных вариантах распределения химических мелиорантов

№ п/п	Доза мелиоранта, т/га		Неравномерность распределения, %			Конечный урожай, ц/га
	Начальная (в почве)	Вносимая	Начальная	При дозе внесения		
				полной		
				половинной	половинной	
На суглинках, $pH_0 = 2,61$						
1	5,65	0	0	не вносился		47,8
2	5,65	0,92	0	0		57,8
3	5,65	1,96+1,96	0	0	0	57,8
4	5,65	0	25	не вносился		46,6
5	5,65	3,92	25	25		55,9
6	5,65	1,96+1,96	25	25	25	56,2
7	5,65	0	50	не вносился		42,9
8	7,07	0	50	не вносился		45,9
9	7,07	2,50	50	25		49,8
10	7,07	2,50	50	0		50,0
11	5,65	3,92	50	50		50,4
12	5,65	1,96+1,96	50	50	50	51,6
13	5,65	3,92	50	25		52,2
14	5,65	3,92	50	0		52,8
На супесях, $pH_0 = 3,06$						
15	2,87	0	0	не вносился		33,8
16	2,87	2,80	0	0		44,6
17	2,87	1,40+1,40	0	0	0	44,6
18	2,87	0	25	не вносился		33,1
19	2,87	2,80	25	25		43,2
20	2,87	1,40+1,40	25	25	25	43,5
21	2,87	0	50	не вносился		30,9
22	3,67	2,00	50	не вносился		34,4
23	3,67	2,00	50	25		39,5
24	3,67	2,00	50	0		39,9
25	2,87	2,80	50	50		39,0
26	2,87	1,40+1,40	50	50	50	40,3
27	2,87	2,80	50	25		41,0
28	2,87	2,80	50	0		41,7

D_n – дисперсия внесения доз, (т/га)².

Преобразуем выражение (4):

$$Y = a + B(X_n + X_p) - C(X_n + X_p) \left[1 + \left(\frac{W_n}{100 \times X_n} / (X_n + X_p) \right)^2 + \left(\frac{W_p}{100 \times X_p} / (X_n + X_p) \right)^2 \right], \quad (5)$$

где X_n – начальная доза мелиоранта для изменения кислотности от максимальной до pH=4,5 т/га;

X_p – вносимая при известковании доза мелиоранта, т/га.

Для максимального урожая на суглинках ($X_n = 5,65$ т/га) $X_p = 3,92$ т/га.

В выражении (5) $W_n/100$ и $W_p/100$ – коэффициент вариации распределения мелиоранта в относительных единицах исходного (начального) распределения вносимых доз $X_n/(X_n + X_p)$ и $X_p/(X_n + X_p)$ – соответственно удельные веса доз начальной и вносимой.

В таблице 2 приведены результаты расчета урожая на суглинках и супесях для средних условий Республики Беларусь при неравномерном содержании химических мелиорантов 0,25 и 50% без известкования, при внесении полной дозы и для известкования последовательно половинными дозами (см. строки 2 и 3, 5 и 6, 11 и 12, 16 и 17, 19 и 20, 25 и 26). В последнем случае в выражении (5) член для полной дозы внесения $(W_n/100 \times X_p / (X_n + X_p))^2$ заменяется двумя одинаковыми для половинных доз:

$$\left(\frac{W_n}{100 \times X_p} / 2(X_n + X_p) \right)^2 + \left(\frac{W_n}{100 \times X_n} / 2(X_n + X_p) \right)^2 = 1/2 \left(\frac{W_n}{100 \times X_p} / (X_n + X_p) \right)^2.$$

Очевидно, что внесение дважды половинной дозы рационально для больших неравномерностей внесения. Для суглинков при неравномерности 50% в этом случае прибавка урожая составит 1,2 ц/га, а на супесях – 0,7 ц/га. При внесении с допуском в настоящее время неравномерностью 25% эта прибавка составляет около 0,3 ц/га и будет поглощена снижением урожая в результате дополнительных проходов распределителей мелиорантов и машин для их заделки, особенно из-за уплотнения почвы и дополнительных энергозатрат.

Если неравномерность внесения даже близка к нулю, что не реально, хотя бы с учетом неточности вождения и производительности при этом перекрытии проходов, она для существующих технологий и средств механизации не будет менее 25%. Поэтому для химмелиорантов вследствие неравномерного внесения в прошлом не позволяет надеяться на существенное улучшение условий произрастания всех растений поля (сравни строки 13 и 14, 27 и 28 таблицы 2). Особенно это характерно для поддерживающего известкования, когда вносятся дозы в 2–3 раза меньше, чем условная доза, содержащаяся в почве (сравни строки 9 и 10, 23 и 24 таблицы 2).

Для имеющей место в нашем случае композиции нормальных законов распределения доз питательных элементов в почве и вносимых суммарное среднеквадратическое отклонение:

$$W_{\Sigma}^2 = W_n^2 + W_p^2 + 2r W_n W_p,$$

где r – коэффициент корреляции находящихся в почве и вносимых доз питательных элементов. Если они

независимы, то $r=0$ и $W_{\Sigma}^2 = W_n^2 + W_p^2$, а при полной отрицательной корреляции $r=-1$ и

$$W_{\Sigma}^2 = W_n^2 + W_p^2 - 2 W_n W_p. \quad (6)$$

Из (6) следует:

$$W_n^2 + W_p^2 > (W_n - W_p)^2.$$

Так как величина урожая больше при меньшей общей дисперсии доз, то чем сильнее отрицательная корреляция начальных и внесенных доз, тем выше урожай, который будет максимальным при полном выравнивании суммарных доз по всему полю.

Таким образом, в настоящее время в области применения удобрений имеет место тупиковая ситуация, которую невозможно разрешить, используя традиционные технологии и системы машин. Единственный путь выравнивания плодородия почв – это компенсационное внесение питательных веществ в зависимости от фактического их наличия на каждом конкретном участке поля.

Для осуществления компенсационного внесения удобрений необходимо разработать исходные требования на эти процессы, создать экспресс-датчики наличия в почве элементов питания, бортовые микропроцессоры для переработки получаемой информации, формирования управляющих сигналов и перенастройки дозирующих устройств машин-удобрителей в процессе их работы.

Только таким путем, выйдя на качественно новый уровень в механизации, можно реализовать потенциальные возможности всех видов удобрений. А это значит – обеспечить окупаемость 1 кг НРК 8–10 кг зерна или 10–12 кг кормовых единиц, повысить качество всей сельскохозяйственной продукции, снизить негативное воздействие средств химизации на среду обитания человека.

Поисковые исследования, проведенные нами совместно с учеными БСХА, БелНИИПА и НИИ прикладных физических проблем, убеждают в реальности разработки новых технологий и компьютеризированных технических средств для внесения удобрений уже в 2000 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степук Л.Я., Румянцев И.В., Юркевич А.И. Теория и расчет штанговых рабочих органов с замкнутым спиральным транспортером для внесения химических мелиорантов. Минск: “Белсельхозмеханизация”, 1993. – С. 80–92.
2. Каплан И.Г., Румянцев И.В. Оценка качества распределения удобрений при их внесении // Вестник с.-х. науки. – 1986. – № 5. – С. 31–37.
3. Методика определения эффективности известкования в производственных условиях по итогам агрохимического картирования почв. – Минск: БелНИИПА, 1990. – 41 с.
4. Инструкция по известкованию кислых почв в колхозах и госхозах Белорусской ССР. / Госагропром БССР, Республиканское произв. объединение “Белсельхозхимия”. – Минск: БелНИИПА, 1988. – С. 6.