

Лекция 4

Технический прогресс в
модели Солоу

План лекции

1. Экзогенный технический прогресс. 3 типа нейтрального технического прогресса
2. Решение модели с трудоинтенсивным техническим прогрессом
3. Иллюстрации к динамике в моделях с другими типами нейтрального технического прогресса
4. Конвергенция и модель Солоу
5. Эмпирическая проверка модели Солоу.

- Обсуждение модели Солоу на минувшей лекции мы завершили выводом о том, что основная часть роста производительности труда не может быть объяснена накоплением капитала. В чем здесь дело? Можно предложить два объяснения:
- 1) **не учитывается какой-то производственный фактор**, который, по-видимому, может накапливаться в значительных масштабах;
- 2) со временем **изменяется сама производственная функция**.

Технический прогресс (1)

- Аргумент об упущенном факторе повесим как ружье на стенку, а вместо этого займемся изменениями производственной функции.
- Из микроэкономики мы помним **производственная функция определяется имеющимися технологиями**. Это означает, что **изменение производственной функции осуществляется за счет технологических изменений**. Эти изменения, в общем, однонаправлены. Как правило, **нам остаются доступны все более старые технологии**; хотя исключения из этого правила хорошо известны, например, греческий огонь. Поэтому **изменения технологии принято называть техническим прогрессом**. Который лишь изредка оборачивается регрессом.

Технический прогресс (2)

- Технологические изменения могут касаться производительности труда и капитала в неодинаковой степени. Поэтому выделяют технический прогресс:
 - Капиталосберегающий;
 - Трудосберегающий;
 - Нейтральный.
- Проблема, однако, в том, что существует ТРИ основных концепции нейтральности технического прогресса (и, соответственно, три понимания капиталосберегающего и трудосберегающего прогресса).
- Еще несколько концепций распространены в меньшей степени (См. [Sato R., Beckman M.J. Neutral Inventions and Production Functions // Review of Economic Studies, 1968, vol. 35, no 1, pp. 57-66](#) и резюме этой лекции)

Нейтральный технический прогресс по Хиксу (1)

Hicks J.R. *Theory of wages*. 1932.

Определение: технический прогресс является нейтральным по Хиксу, если соотношение предельных продуктов (иными словами, предельная норма технической замены) факторов является независимым от технического прогресса.

В каком случае технический прогресс будет нейтральным по Хиксу?

Вывод приведен по:

Sato, Beckmann, *Op. cit.*

Нейтральный технический прогресс по Хиксу (2)

Пусть $A(t)$ является показателем развития технологии, и в экономике наблюдается единичная отдача от масштаба. Тогда производственную функцию можно будет записать в интенсивной форме

$$y = y(A, k)$$

Определим отношение предельных продуктов как

$$R(k, t) = r(k, t) / w(k, t)$$

Тогда нейтральность по Хиксу подразумевает

$$R(k, t) = \bar{R}(k) \text{ и, значит,}$$

$$\partial R(k, t) / \partial t = 0.$$

Нейтральный технический прогресс по Хиксу (3)

Поскольку $\bar{R}(k) = \frac{y - ky'_k}{y'_k} = \frac{y}{y'_k} - k,$

$$(\ln y(k, t))' = \frac{y'_k}{y} = \frac{1}{\bar{R}(k) + k}.$$

Интегрируем по t и k .

$$\ln y(k, t) - \ln A(t) = \int \frac{\partial k}{\bar{R}(k) + k},$$

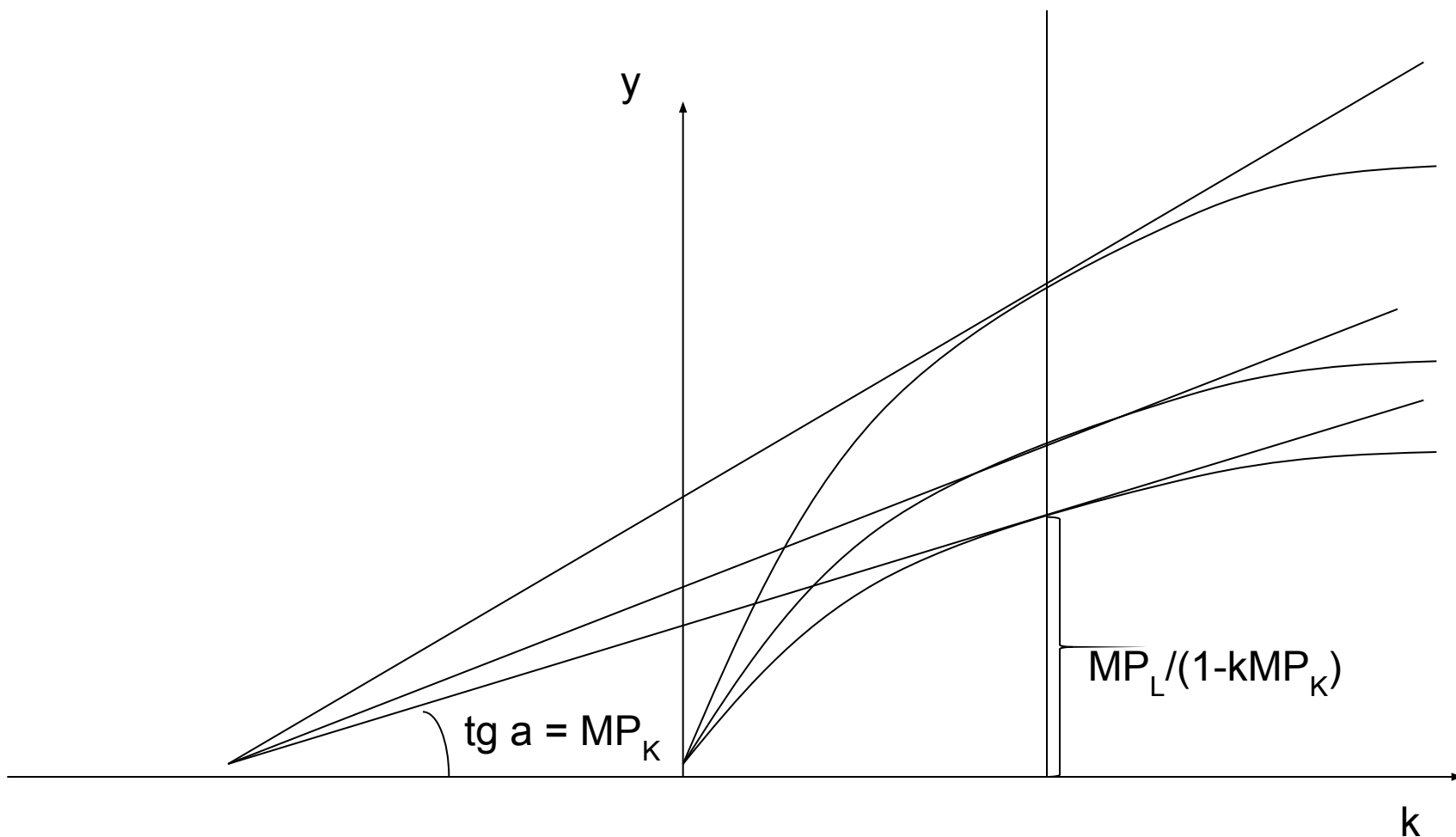
где $A(t)$ – константа, возникающая при интегрировании, отражающая уровень технологии.

Обозначим $y(k) = \exp \left[\int \frac{\partial k}{\bar{R}(k) + k} \right],$ тогда

$$y(k, t) = A(t)y(k).$$

Нейтральный технический прогресс по Хиксу (4)

ТГЛ, с.536



Нейтральный технический прогресс по Харроду (1)

Харрод Р. К теории экономической динамики. 1959, 1997 и др.
[Harrod R. Towards a Dynamics Economics, 1942]

Определение: технический прогресс является нейтральным по Харроду, если предельный продукт капитала остается неизменным при постоянном уровне капиталоемкости выпуска..

В каком случае технический прогресс будет нейтральным по Харроду?

Теорема Джоан Робинсон о нейтральности инноваций:

Технические инновации, отражаемые производственной функцией $F(K,L,t)$, являются нейтральными по Харроду тогда и только тогда, когда производственная функция принимает вид $F(K,L,t) = G(K,A(t)L)$.

Доказательство приведено по Uzawa H. Neutral Inventions and the Stability of Growth Equilibrium // Review of Economic Studies, 1961, vol. 28, no 2, pp. 119-120.

Нейтральный технический прогресс по Харроду (2)

Пусть $A(t)$ является показателем развития технологии, и в экономике наблюдается единичная отдача от масштаба. Тогда производственную функцию можно будет записать в интенсивной форме

$$y = y(A, k)$$

Поскольку $y_k < 0, y_{kk} < 0$ производственную функцию

можно представить в виде

$$y = \varphi(x, t), \text{ где } x = k / y$$

Тогда

$$dy = \varphi_x dx;$$

$$dk = xdy + ydx.$$

$$\frac{\partial y}{\partial k} = \frac{\varphi_x dx}{x\varphi_x dx + \varphi dx}$$

$$\frac{\partial y}{\partial k} = \frac{\varphi_x}{x\varphi_x + \varphi}$$

Нейтральный технический прогресс по Харроду (3)

Тогда нейтральность по Харроду подразумевает,

что $\partial y / \partial k$ не зависит от технического прогресса:

$$\frac{\partial y}{\partial k} = \bar{C}(x),$$

$$\partial C(x, t) / \partial t = 0.$$

$$\frac{x\varphi_x + \varphi}{\varphi_x} = \frac{1}{\bar{C}(x)}$$

$$x + \frac{\varphi}{\varphi_x} = \frac{1}{\bar{C}(x)}$$

$$\frac{\varphi_x}{\varphi} = \frac{1}{1/\bar{C}(x) - x}$$

Теперь мы попадаем в уже знакомую ситуацию с той разницей,

что функция у нас не капиталовооруженности, а капиталоемкости

Нейтральный технический прогресс по Харроду (4)

$$(\ln \varphi(x, t))' = \frac{\varphi_k}{\varphi} = \frac{1}{1/\bar{C}(x) - x}.$$

Интегрируем по t и x :

$$\ln \varphi(x, t) - \ln A(t) = \int \frac{\partial x}{1/\bar{C}(x) - x},$$

где $A(t)$ – константа, возникающая при интегрировании, отражающая уровень технологии.

Обозначим $\psi(x) = \exp\left[\int \frac{\partial x}{1/\bar{C}(x) - x}\right]$, тогда

$$\varphi(x, t) = A(t)\psi(x).$$

Нейтральный технический прогресс по Харроду (5)

$\psi(x)$ монотонно возрастающая.

В самом деле, логарифмирование является монотонным преобразованием.

$$\ln(\psi(x))'_x = \frac{1}{1/\bar{C}(x) - x}$$

$$\frac{1}{1/\bar{C}(x) - x} > 0, \text{ при } \frac{1}{\bar{C}(x)x} > 1.$$

$$\frac{x\varphi_x + \varphi}{x\varphi_x} = 1 + \frac{\varphi}{x\varphi_x}$$

Однако, $\varphi = y(x, t) > 0, x = k/y > 0$

Остается определить знак φ_x .

$$\varphi_x = \frac{\hat{\partial}y}{\hat{\partial}(k/y)} = \frac{y}{\frac{\hat{\partial}k}{\hat{\partial}y} - \frac{k}{y}} = \frac{y}{1/MP_K - 1/AP_K}$$

Условия Инады предполагают $MP_K < AP_K$ и, значит, $\varphi_x > 0$

Нейтральный технический прогресс по Харроду (6)

Поскольку $\psi(x)$ монотонно возрастающая,

мы можем построить обратную ей функцию ξ :

$$x = \xi[y / A(t)]$$

Поскольку $x = k / y$, домножив на $y / A(t)$, получим

$$\frac{k}{A(t)} = \frac{y}{A(t)} \xi[y / A(t)]$$

Запишем это:

$$\frac{y}{A(t)} = g[k / A(t)]$$

$y = A(t)g[k / A(t)]$ – наша производственная функция в интенсивной форме

Пусть $G(K, L) = g(k)L$.

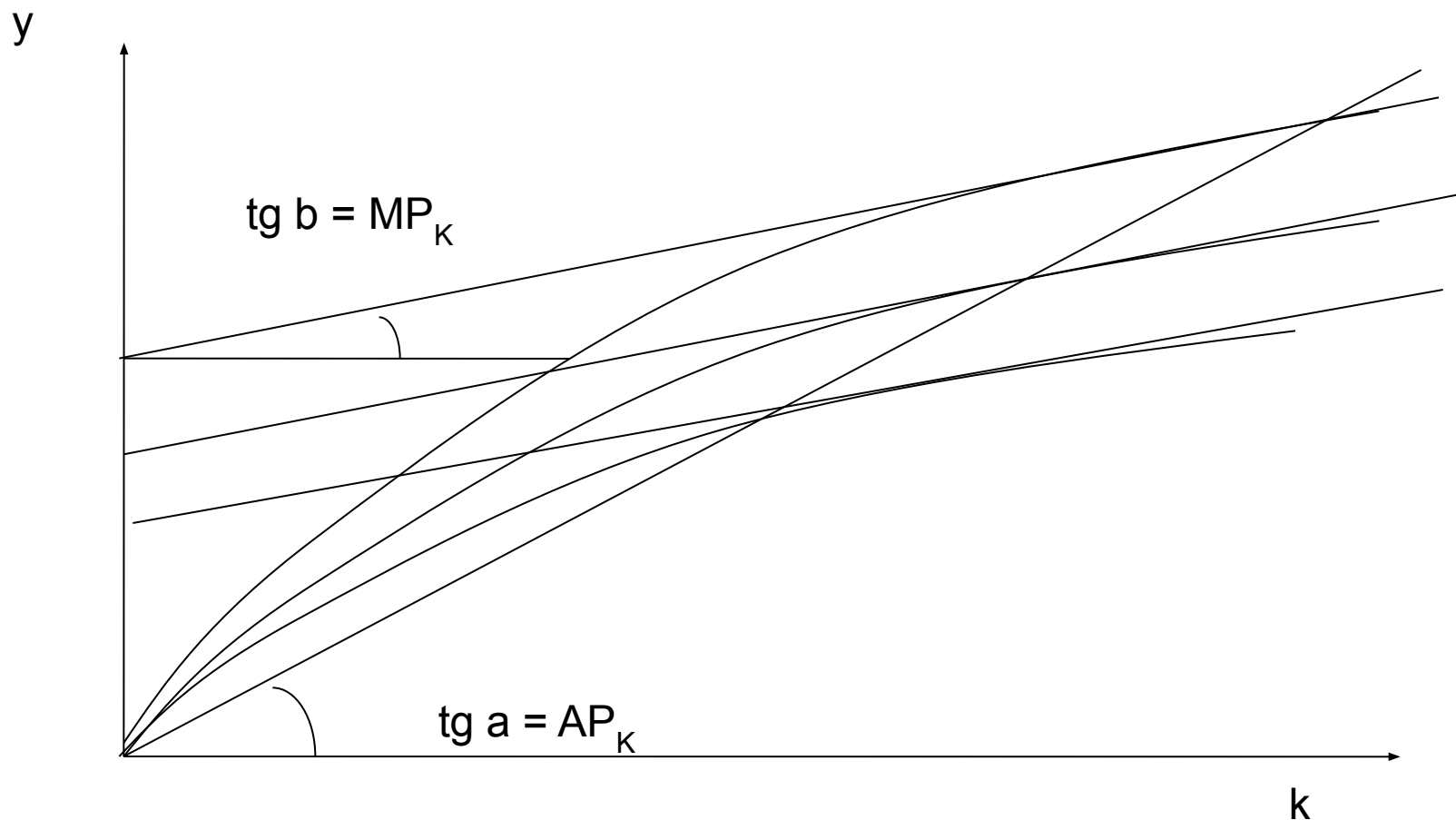
Тогда, учитывая постоянную отдачу от масштаба, получаем:

$$Y = G(K, A(t)L)$$

Ч.Т.Д.

Нейтральный технический прогресс по Харроду (7)

ТГЛ, с. 537



Нейтральный технический прогресс по Солоу (1)

Solow R. Thechnical Progress, Capital Formation, and Economic Growth // American Economic Review, 1962, Proceedings, pp. 76-86.

Определение: технический прогресс является нейтральным по Солоу, если предельный продукт труда остается неизменным при сохранении средней производительности труда.

Легко видно, что Солоу предлагает в точности то же самое, что и Харрод, только для капитала, а не для труда. Поэтому-то

$$F(K,L,t) = G(A(t)K, L).$$

Нейтральный технический прогресс по Солоу (2)

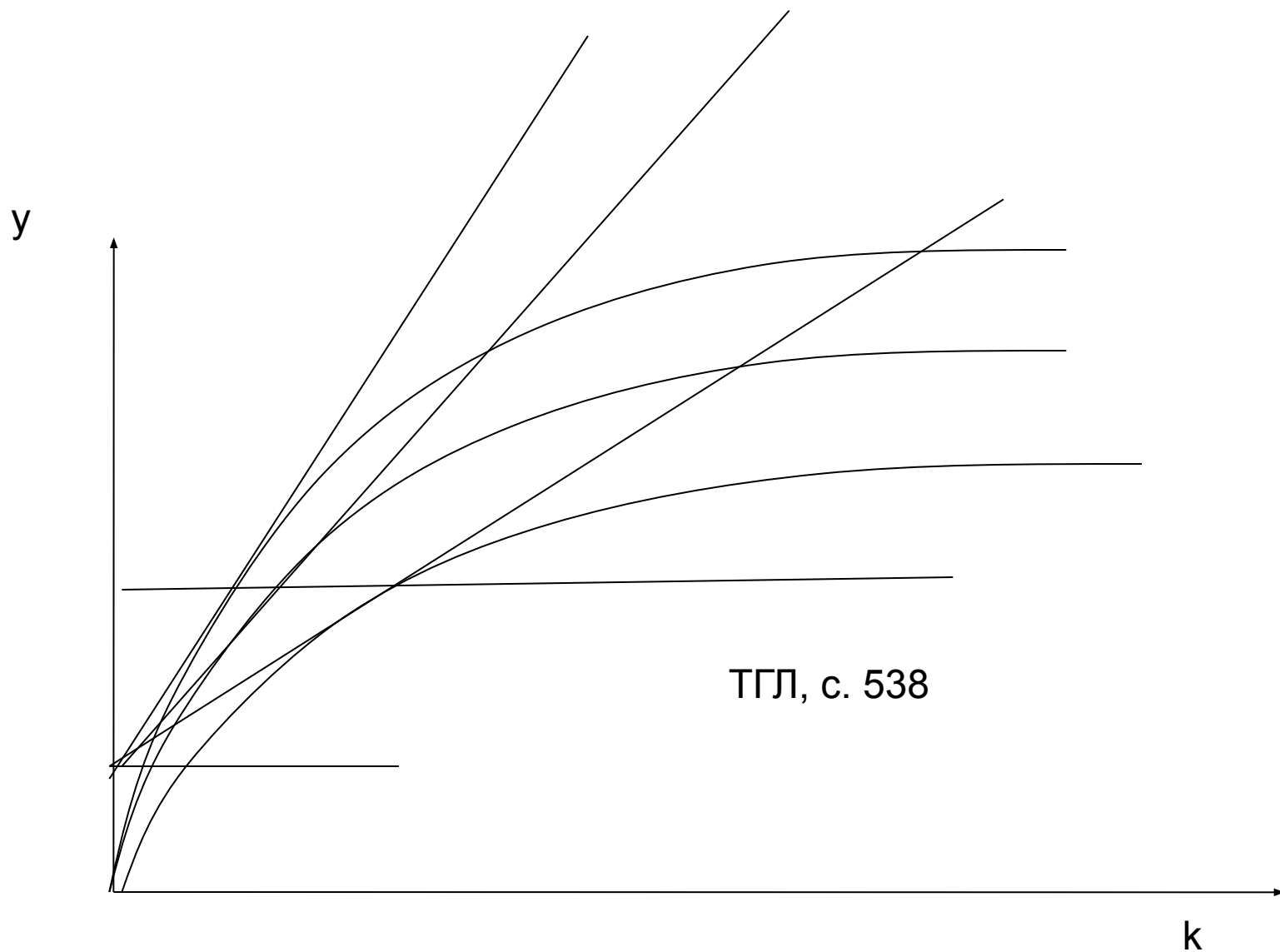


Таблица типов нейтрального технического прогресса

Sato & Beckmann (1968) привели классификацию видов нейтральных техпрогрессов.

SUMMARY OF CLASSIFICATIONS

is invariant with respect to		1 L/K	2 Y/K	3 Y/L	4 R	5 r	6 w	7 β
1	$\frac{L}{K}$							
2	$\frac{Y}{K}$	No technical						
3	$\frac{Y}{L}$	progress						
4	R	I Hicks	VI	VII				
5	r	IX	II Harrod	V	XV			
6	w	VIII	IV	III Solow	No technical	progress		
7	β	I	II	III	I	II	III	
8	σ	X	XI	XII	XIII	not integrable by quadrature		Factor Augmenting XIV

Три вида нейтральности – Резюме (1)

Нейтральность по...	Общая форма	Примеры
Хиксу	$Y=A(t)F(K,L)$	$Y=e^{\lambda t}(K^a L^{1-a})$ $Y=e^{\lambda t}(K^{1/2} L^{1/2})^2$
Харроду	$Y=G(K,A(t)L)$	$Y=(K^a(e^{\mu t}L)^{1-a})$ $Y=(K^\theta(e^{\mu t}L)^\theta)^{1/\theta}$
Солоу	$Y=G(A(t)K,L)$	$Y=((e^{vt}K)^a L)^{1-a}$

Назад к модели Солоу

- Сначала мы обсудим поведение модели Солоу в предположении о том, что в экономике присутствует нейтральный по Харроду технический прогресс.
- Итак, производственная функция выглядит следующим образом: $Y = G(K, e^{gt}L)$. При этом скорость населения растет в экономике n : $L(t) = L(0) e^{nt}$
- Совершим следующий трюк: будем учитывать число рабочих не в реальных, а в «эффективных рабочих»
- Например, в экономике работало 5 рабочих. В результате технического прогресса их производительность выросла на 20%. Новых рабочих не появилось. Тогда будем считать, что эффективных рабочих стало 6 (эти пять работают за шестерых).

Назад к модели Солоу (2)

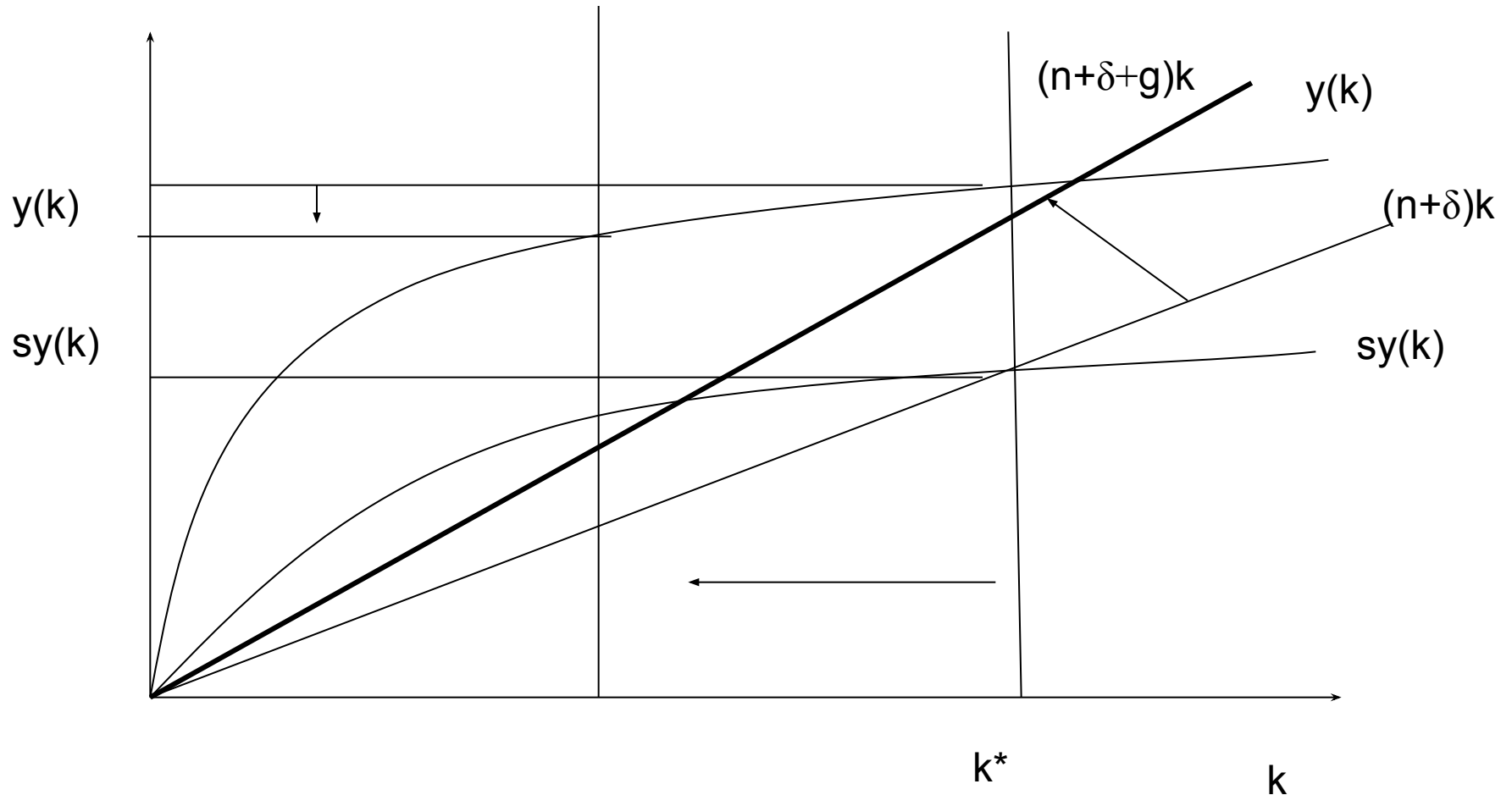
Тогда $N(t) = L(0)e^{nt}e^{gt}$,

$$a \hat{N} = n + g.$$

Получается, что технический прогресс выражается

как бы ускорением темпов роста численности населения

Ускорение технического прогресса (по Харроду) снижает капиталовооруженность, выпуск и объем сбережений в расчете на 1 **эффективного** рабочего



Модель Солоу с техническим прогрессом (1)

- Однако с точки зрения настоящего рабочего стационарное состояние характеризуется постоянным ростом капиталовооруженности, выпуска и заработной платы. То есть в данном случае стационарное состояние подразумевает постоянный рост.
- Но каковы характеристики этого роста?

Модель Солоу с техническим прогрессом (2)

$$k^* = \frac{K}{N} = \frac{sy(k)}{n + \delta + g};$$

$$\hat{k}^* = \dot{k}^* / k^* = 0;$$

$$\hat{N} = n + g;$$

$$\hat{K} = \hat{k}^* + \hat{N} = n + g$$

$$\hat{K} / L = n + g - n = g.$$

- Как мы помним, капиталовооруженность рассчитывалась на одного эффективного рабочего
- Поэтому темпы роста капиталовооруженности на одного настоящего рабочего будут равны g .