УДК 658.51.012

О.М. ПИГНАСТЫЙ
Национальный Технический Университет "ХПИ"

О КРИТЕРИЯХ ПОДОБИЯ ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ

В статье анализируются режимы функционирования производственных поточных линий, приводятся общие закономерности движения предметов труда по технологическому маршруту в зависимости от интервала подачи заготовок на первую технологическую операцию. Детально рассмотрены два принципиально отличающиеся режима функционирования поточной производственной линии. Обсуждается критерий подобия для производственных поточных линий.

Ключевые слова: кинетическое уравнение, производственная линия, массовое производство, незавершенное производство, балансовые уравнения, квазистатический процесс, стохастический процесс.

О.М. ПІГНАСТИЙ
Національний Технічний Університет "ХПІ"

ПРО КРИТЕРІЇ ПОДІБНОСТІ ПОТОЧНИХ ЛІНІЙ

У статті аналізуються режими функціонування виробничих поточних ліній, наводяться загальні закономірності руху предметів труда по технологічному маршруту в залежності від інтервалу подачі заготовок на першу технологічну операцію. Детально розглянуті два принципово відмінних режиму функціонування поточної виробничої лінії. Обговорюється критерій подібності для виробничих поточних ліній.

Ключові слова: кінетичне рівняння, виробнича лінія, масове виробництво, незавершене виробництво, балансові рівняння, квазістатичний процес, стохастичний процес.

O.M. PIHNASTYI
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

ABOUT SIMILARITY CRITERIA OF THE PRODUCTION LINES

In the article modes of the functioning of the production flow lines are analyzed. General laws of the movement of objects of the labour along the technological route are given. Depending on the interval of supply of blanks to the first technological operation. Two principally different modes of the operation of the production flow line are considered in detail. A similarity criterion is discussed for production flow lines.

Keywords: kinetic equation, the production line, mass production, work in progress, balance equations, quasi-static process, stochastic process

Постановка проблемы и анализ последних публикаций

Постановка экспериментов позволяет установить общие закономерности для поведения параметров поточных линий разных производственных систем [1]. Для практических исследований важно выбрать минимальное число безразмерных параметров, отражающих в наиболее удобной форме основные эффекты исследуемых технологических процессов. Постановка и обработка экспериментальных данных требует учета вопросов подобия и размерности. В начальной стадии изучения некоторых сложных явлений производственных процессов теория подобия является единственно возможным теоретическим методом, может привести к довольно существенным результатам. Особенно ценно то, что с помощью теории подобия можно получить важные результаты при рассмотрении процессов, которые зависят от большого количества параметров, но при этом так, что некоторые из этих параметров в известных случаях становятся несущественными [2, 3]. Теория подобия позволяет определить область значений параметров, допускающих аналитическое решение кинетических и балансовых уравнений [4, 5]. Кинетическое уравнение производственного процесса может быть представлено в виде [6]:

$$\frac{\partial\chi}{\partial t}+\frac{\partial\chi}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi}{\partial\mu}\cdot f(t,S)=\lambda_{Plant}\cdot\left\{\varphi(t,S,\mu)\cdot[\chi]_1-\mu\cdot\chi\right\}. \quad (1)$$

где $S\in[0,S_d]$ – координата технологической позиции, определяющей положение предмета труда вдоль технологического маршрута; μ –интенсивность переноса технологических продуктов на предмет труда; $\chi(t,S,\mu)$ – фазовая функции распределения предметов по состояниям в технологическом пространстве в момент времени t; $\varphi(t,S,\mu)$ – функция, характеризующая процесс взаимодействия предметов труда с технологическим оборудованием, расположенным вдоль технологического маршрута с плотностью λ_{Plant}. В большинстве практических случаях функция $\varphi(t,S,\mu)$ не зависит от состояния предметов труда до испытания воздействия со стороны технологического оборудования; $[\chi]_1(S,\mu)$ – темп обработки предмета труда на технологической позиции, характеризующейся координатой S; $f(t,S)$ – инженерно-производственная функция [7]:

$$\frac{d\mu}{dt}=\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{[\chi]_{1_\psi}(t,S)}{[\chi]_0(t,S)}\right)+\frac{[\chi]_{1_\psi}(t,S)}{[\chi]_0(t,S)}\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{[\chi]_{1_\psi}(t,S)}{[\chi]_0(t,S)}\right)=f(t,S), \qquad \mu=\frac{dS}{dt}, \tag{2}$$

определяющая технологию производства продукта [8–10]. В силу того, что произведение $\chi(t,S,\mu)\cdot d\Omega$ представляет собой число предметов труда в ячейке $d\Omega$ фазового пространства с координатами $S_j\in[S,S+dS[$, $\mu_j\in[\mu,\mu+d\mu[$, то интегрирование по объему Ω фазового пространства (S,μ) дает, общее количество N предметов труда, находящееся в незавершенном производстве [6, 11]:

$$\int_0^{S_d}\int_0^{\infty}\chi(t,S,\mu)d\mu dS=N, \qquad \Omega=\int_0^{S_d}\int_0^{\infty}d\mu dS \tag{3}$$

Решение уравнений (1) связано со значительными трудностями [4,5]. В связи с этим первый шаг анализа должен состоять в оценке порядка величин слагаемых интегро-дифференциального уравнения. При анализе производственного процесса предприятия с поточным методом организации производства выделяют три характерные величины технологического процесса: Δt_{0m}–основное технологическое время выполнения m-ой технологической операции [12], промежуток времени, в течение которого предмет труда находится в непосредственной обработки; $\Delta t_{dm}=\Delta t_0 N_m$–время обработки предмета на m-ой технологической операции с очередью деталей на обработку (N_m-1) [12]; $T_d=\sum_{m=1}^{M}\Delta t_{dm}$– производственный цикл обработки предмета труда [13]; M–количество технологических операций в производственном процессе.

Основная часть

Режим работы технологического оборудования без ожидания предметом труда своей очереди на обработку в накопителе. Если на первую технологическую операцию предметы труда поступают через промежуток времени $\Delta t\ge\Delta t_{0\max}$, $\Delta t_{0\max}=\max\{\Delta t_{01},\Delta t_{02},...,\Delta t_{0m},...,\Delta t_{0M}\}$, то технологические траектории предметов труда не имеют участков ожидания предметом труда процесса обработки (рис.1). Технологическая траектория j-го предмета труда может быть построена путем параллельного переноса траектории (j-1)-го предмета труда по шкале времени на величину Δt. Время обработки каждого предмета труда по нормативной технологической траектории постоянно, а интервал поступления материала на первую технологическую операцию соответствует интервалу выхода готового продукта. Данный случай характеризуется тем, что при отсутствии ожидания предметом труда процесса обработки существует простой оборудования в ожидании поступления предмета труда на обработку в течение промежутка времени $\Delta t_{\psi w}=(\Delta t_{0\max}-\Delta t_{0m})$. При обработке N–предметов труда это время простоя оборудования на m–ой технологической операции составит $N\cdot\Delta t_{\psi w}=N\cdot(\Delta t_{0\max}-\Delta t_{0m})$. Простой оборудования отсутствует в случае синхронизованной обработки предметов труда, когда для каждой технологической операции выполняется соотношение $\Delta t_{0\max}=\Delta t_{0m}$ или до начала обработки в межоперационных накопителях находились предметы труда в необходимом для бесперебойной работы количестве N_m. Это количество можно определить, разделив время простоя оборудования $N\cdot\Delta t_{\psi w}$ на время выполнения технологической операции Δt_{0m}

$$N_m=\frac{\Delta t_{\psi w}}{\Delta t_{0m}}N \tag{4}$$

Межоперационный накопитель с межоперационным размером в нем N_m предметов труда обеспечит бесперебойную работу производственной линии на m-ой технологической операции при изготовлении партии деталей размером N. Минимальное количество предметов труда WIP (work-in-progress) [14], необходимое для обеспечения бесперебойной работы производственной линии на всех технологических операциях есть величина

$$WIP = \sum_{m=1}^{M} N_m = N \sum_{m=1}^{M} \frac{\Delta t_{\psi w}}{\Delta t_{0m}}. \qquad (5)$$

При $\left(\Delta t_{\psi w} / \Delta t_{0m}\right) << 1$ получает $N_m \to 0$. Отсюда следует вывод, что для синхронизированного режима работы поточной линии без наличия простоев минимальным достаточным количеством предметов труда является величина $(2M - 1)$, из которой M предметов труда находятся в процессе обработки, а $(M - 1)$ предмет труда в процессе ожидания. Использовано выражение $(2M - 1)$ в связи с тем, что по крайней мере для одного предмета труда справедливо соотношение $\Delta t_{\psi w} \equiv 0$, откуда $N_m \equiv 0$.

Режим работы технологического оборудования с ожиданием предметом труда своей очереди на обработку в накопителе. Дальнейшее уменьшение промежутка времени между поступлением предметов труда на первую технологическую операцию Δt приводит к искажению технологических

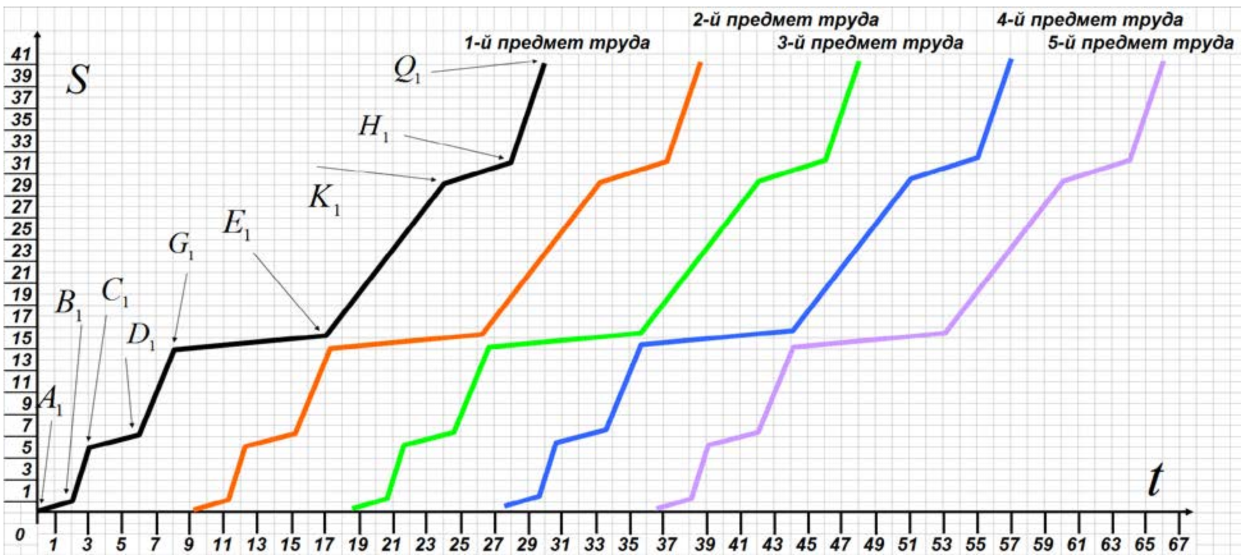

Рис. 1. Траектории партии предметов труда без ожидания входных накопителях

траекторий предметов труда (рис. 2), $\Delta t < \Delta t_{0max}$. Появляются технологические операции, перед которыми предмет труда находится в ожидании технологической обработки. В этих местах технологические траектории деформируются, вытягиваются по оси времени (перед 3-ей и 5-ой технологической операцией, рис.2). Технологические операции можно разделить на две группы [15,16]:

а) $\Delta t \geq \Delta t_{0m}$. Межоперационные заделы таких технологических операций уменьшаются с течением времени. Для бесперебойной работы на данной технологической операции размер буфера может быть определен по формуле (4);

б) $\Delta t < \Delta t_{0m}$. Межоперационные заделы некоторых таких технологических операций увеличиваются с течением времени. Для обеспечения бесперебойной работы для таких технологических операций требуется межоперационный накопитель такого размера, который обеспечит достаточно пространства для хранения заготовок, находящихся в процессе ожидания обработки. Операции, на которых идет увеличение количества межоперационных заделов, должны удовлетворять равенству

$$\Delta t_{0m} = \max\{\Delta t_{01}, \Delta t_{02}, \Delta t_{03}, ..., \Delta t_{0m-1}, \Delta t_{0m}\}. \qquad (6)$$

На остальных операция, которые не удовлетворяют условию (6), но для которых $\Delta t < \Delta t_{0m}$, идет уменьшение размера межоперационных заделов в накопителях. В местах технологического маршрута, для которых удовлетворяется условие (6), происходит деформация технологических траекторий. Дальнейшее уменьшение приводит к последующей модификации технологических траекторий.

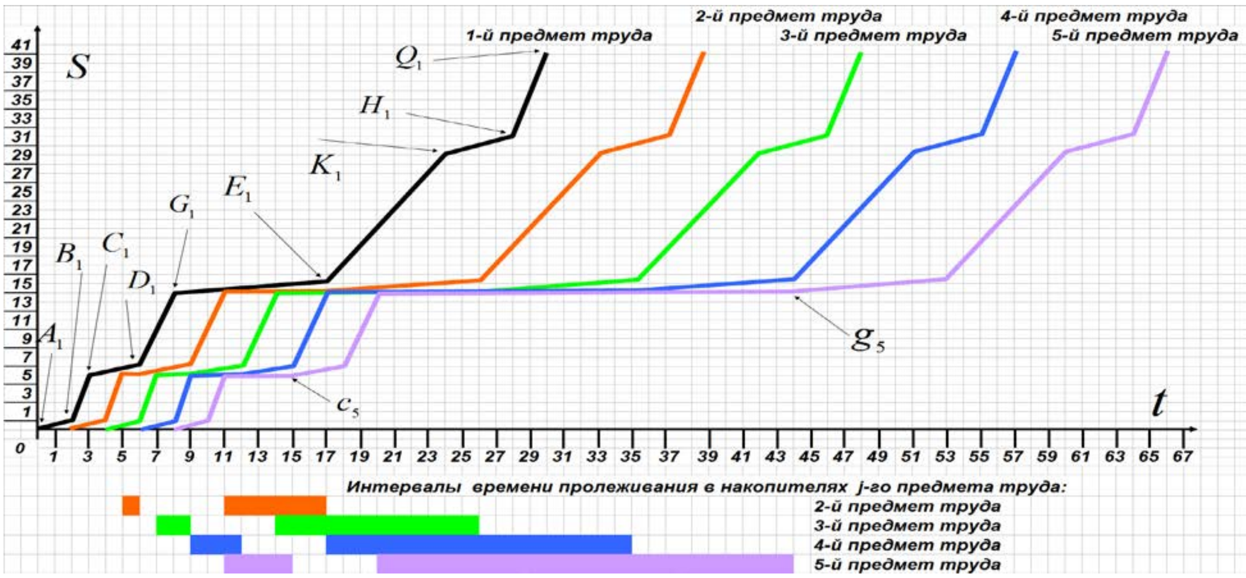

Рис. 2. Траектории партии предметов труда с ожидания во входных накопителях

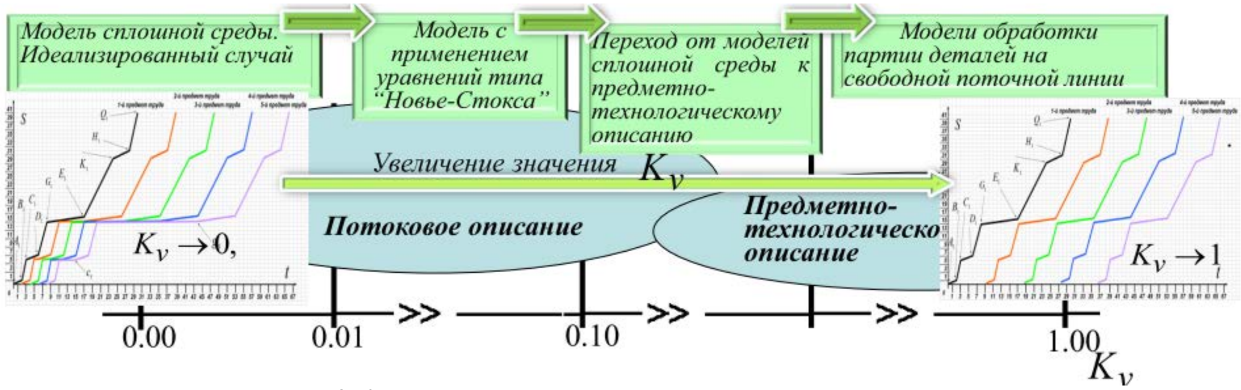

Рис. 3. Критерии использования моделей описания поточной линии

Характерные числа для описании режимов функционирования поточных линий. Для качественного рассмотрения производственных явлений, возникающих в результате движения предметов труда вдоль технологического маршрута выше исследовано влияние размера интервала Δt (интервала между подачей предметов труда на первую технологическую операцию) на вид технологических траекторий (рис.1,рис.2). Данная оценка имеет качественный характер, определяет какое производственное явление рассматривается. В состоянии статистического равновесия кинетическое уравнение (1) имеет вид [17]

$$\frac{d\chi}{dt} = 0, \tag{7}$$

в силу того, что

$$\varphi(\mathrm{t}, \mathrm{S}, \mu) \cdot [\chi]_1 - \mu \cdot \chi_0 = 0 \tag{8}$$

для равновесного случая $\chi = \chi_0$. Для грубой оценки уравнение (1) представим в виде

$$\frac{d\chi}{dt} = -\langle \lambda_{Plant} \rangle \cdot \langle \mu \rangle \cdot (\chi - \chi_0); \qquad \chi_0 = \frac{\varphi(\mathrm{t}, \mathrm{S}, \mu) \cdot [\chi]_1}{\mu} \tag{9}$$

$$\langle \mu \rangle \approx s_0 / (\langle N_m \rangle \Delta t_0); \tag{10}$$

где - $\langle \mu \rangle$ -средняя скорость прохождения технологической операции предметом труда; s_0 -характерная протяженность технологической операции при среднем времени выполнения Δt_0 с характерным размером межоперационного задела $\langle N_m \rangle$. Параметры $\langle \mu \rangle$, s_0 , Δt_0 отражают характеристики производственного процесса. Их можно интерпретировать как усредненные величины по операциям технологического маршрута. Отобразив разность $(\chi - \chi_0)$ в правой части (9) , тем самым учитывается, что правая часть уравнения (1) превращается в ноль для равновесной функции распределения $\chi = \chi_0$ [18]. Плотность $\langle \lambda_{Plant} \rangle$ расположения технологического оборудования вдоль технологического маршрута может быть оценена следующим выражением

$$\langle \lambda_{Plant} \rangle \approx (M / S_d) = 1/ s_0 . \tag{11}$$

Подставим соотношения (10),(11) в уравнение (9)

$$\frac{d\chi}{dt} = -\frac{1}{s_0} \cdot \frac{s_0}{\langle N_m \rangle \Delta t_0} \cdot (\chi - \chi_0) = \frac{(\chi - \chi_0)}{\langle N_m \rangle \Delta t_0} \tag{12}$$

получим грубую оценку правой части уравнения (9). Интервал времени

$$\Delta t_{0\psi} = \langle N_m \rangle \Delta t_0 \tag{13}$$

представляет время между обработкой предмета труда на двух рядом стоящих технологических операциях. Перепишем уравнение (12) используя обозначение (13)

$$\frac{d\chi}{dt} = -\frac{(\chi - \chi_0)}{\Delta t_{0\psi}} . \tag{14}$$

Введем обозначения τ , θ характерные время и шаг по переменной S:

$$t = \Delta t \cdot \tau ; \qquad \chi = \langle \chi_0 \rangle \cdot \theta , \qquad \chi_0 = \langle \chi_0 \rangle \cdot \theta_0 \tag{15}$$

и представим уравнение (14) в безразмерном виде

$$\frac{\langle \chi_0 \rangle \cdot d\theta}{\Delta t \cdot d\tau} = -\langle \chi_0 \rangle \frac{(\theta - \theta_0)}{\Delta t_{0\psi}} \tag{16}$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{\Delta t}{\Delta t_{0\psi}} (\theta - \theta_0)$$

где $\langle \chi_0 \rangle$ - характерное значение для плотности предметов труда вдоль технологического маршрута. Введем число

$$K_v = \frac{\Delta t_{0\psi}}{\Delta t} , \tag{17}$$

в качестве критерия подобия производственного процесса [4,19,20,21]. Данный критерий является соотношением между характерным временем рассмотрения производственных явлений Δt и временем $\Delta t_{0\psi}$, которое необходимо на обработку предмета труда, поступившего в очередь m-технологической операции.

Анализ полученных результатов. Случай $K_v \geq 1$ соответствует режиму, когда интервал времени Δt между запуском предметов труда в обработку больше, чем характерное время обработки $\Delta t_{0\psi}$ предмета труда, находящегося в очереди на обработку. При $\Delta t_{0\psi} = \Delta t_{0\max}$ вид технологических траекторий представлен на рис.1, а анализ траекторий движения предметов труда вдоль технологического маршрута обсужден в разделе настоящей статьи "Режим работы технологического оборудования без ожидания предметом труда своей очереди на обработку в накопителе". Случай $K_v >> 1$ соответствует режиму простоя технологического оборудования. Режим при $K_v = 10$ говорит о том, что на первую технологическую операцию запускается предмет труда тогда, когда запущенный перед ним в обработку на первой технологической операции находится уже на 10-й. При $K_v >> 1$ нормальным является явление, когда предмет труда запускается в обработку на первую технологическую операцию уже после того, как предыдущий предмет труда прошел все стадии обработки и превратился в готовое изделие. При $K_v < 1$ технологические траектории начинают деформироваться на некоторых технологических операциях (рис.2). При $K_v \to 0$ практически деформации подвергнуты узлы каждой технологической операции. Решение уравнения (1) можно представить в виде [19]

$$\chi(t,S,\mu)=\sum_{i=0}^{\infty}K_v{}^i\chi_i(t,S,\mu), \qquad K_v\to 0. \tag{18}$$

Вид функции распределения $\chi_0(t,S,\mu)$ находится из балансового равновесного уравнения (8)

$$\chi_0(t,S,\mu)=\frac{\varphi(t,S,\mu)\cdot[\chi]_1}{\mu}. \tag{19}$$

Вид функции следующего приближения $\chi_1(t,S,\mu)$ определим из (1) принимая во внимание (9)-(14)

$$K_v\frac{d\left(\chi_0(t,S,\mu)+\chi_1(t,S,\mu)\right)}{dt}=-\chi_1(t,S,\mu) \quad . \tag{20}$$

Так как $\chi_0(t,S,\mu)>>\chi_1(t,S,\mu)$, то следует

$$\chi_1(t,S,\mu)=-K_v\frac{d\chi_0(t,S,\mu)}{dt} \quad . \tag{21}$$

$$\chi_i(t,S,\mu)=-K_v\frac{d\chi_{i-1}(t,S,\mu)}{dt} \quad . \tag{22}$$

Выводы

Значение характерных чисел K_v (17), определяющие тип технологического процесса производственной системы, дают возможность обосновать выбор модели описания поточной линии [22, 23]. При построении построение ограничений перспективным является использование методов континуального линейного программирования [24]. Оценку следует воспринимать как качественную, позволяющую для каждого типа технологического процесса построить соответствующую ему адекватную модель описания. Характерное число K_v предусматривает два основных предельных случая: $K_v\to 0$ и $K_v\to 1$. Класс технологических процессов производственных систем, для которых $K_v\to 0$ соответствует технологическому процессу с высокой концентрацией технологического оборудования и плотным потоком предметов труда по технологическому маршруту от одной технологической операции к другой. Это производственные системы с массовым производством продукции. Случай $K_v\to 1$ соответствует переходу от массового типа производства к мелкосерийном через стадии крупносерийного и серийного производства.

При $K_v>>1$ мы имеем дело с единичным типом производства. Таким образом, технологический процесс производственной системы может быть классифицирован в соответствии со значениями характерных чисел. Характерные числа дают качественную оценку состояния, определяющего тип производства (массовый, серийный, единичный), которому должна соответствовать строго определенная модель описания производственной линии. Уравнения (18)-(21) позволяют с достаточной точностью описать поточную линию для производственной системы массового типа. Точность определяется количеством слагаемых в разложении (18).

Производственные поточные линии с одинаковыми значениями характерных чисел K_v (17) являются подобными, имеют общие закономерности поведения потоковых параметров производственной линии [25]. Такие поточные линии могут быть описаны одними и теми же моделями. Каждому интервалу характерных чисел K_v соответствует модель своего типа.

Список использованной литературы

1. Armbruster D. Continuous models for production flows. In Proceedings of the 2004 American Control Conference. / D. Armbruster, C. Ringhofer, T- J. Jo. – Boston: MA, 2004. – P. 4589–4594.
2. Гухман А.А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М.: Высш. шк., 1973. – С. 152.
3. Седов Л.И. Теория подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1954. – С. 328.
4. Пигнастый О. М. К вопросу подобия технологических процессов производственно-технических систем / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2011. – №2– С. 29-35. –Available at: https://goo.gl/0N1Sql
5. Крылов Н.М. Введение в нелинейную механику / Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов. – К.: Наука, Гл. ред. физ. - мат. лит., 1937. – С. 310.
6. Пигнастый О. М. О выводе кинетического уравнения производственного процесса / О. М. Пигнастый // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2015. – № 3 (54). – С. 439 –446. –Available at: https://goo.gl/z5pLdE

7. Пигнастый О. М. Инженерно-производственная функция предприятия с серийным или массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ, 2005. – № 42(3). – С. 111–117.
8. Заруба В.Я. Моделирование движения предмета труда по технологическому маршруту в двухкоординатном описании / В.Я. Заруба О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Технічний прогрес та ефективність виробництва. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 60 (1169). – С. 39–45.
9. Заруба В.Я. Моделирование движения предмета труда в пространстве состояний на примере технологии токарной обработки / В.Я. Заруба, О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Технічний прогрес та ефективність виробництва. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 27 (1199). – С. 33–37.
10. Пигнастый О.М. Модель производственного процесса обработки партии предметов труда / О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: МГТУ им. Носова. – 2016. – № 1(11). – С. 24–32.
11. Демуцкий В.П. Использование методов статистической физики для исследования экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В.П. Демуцкий, О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Вісник Харківського національного університету. – Харків: ХНУ, 2005. – № 710. – С. 128–134.
12. Пигнастый О.М. Сетевая модель многоресурсной поточной производственной линии / О.М. Пигнастый // Научный результат. Серия "Информационные технологии". – Белгород: БГУ, 2016. – Т.1. – №2. – С. 31–45.
13. Пигнастый О.М. Расчет производственного цикла с применением статистической теории производственно-технических систем / О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. – К.: Видавничий дім "Академперіодика". – 2009. – №12. – С. 38–44. –Available at: https://goo.gl/Qw6qqK
14. Пигнастый О.М. О новом классе динамических моделей поточных линий производственных систем / О.М. Пигнастый // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – Белгород: БГУ, 2014. – № 31/1. – С. 147–157 –Available at: https://goo.gl/9k3v1r
15. Пигнастый О.М. Обзор моделей управляемых производственных процессов поточных линий производственных систем / О.М. Пигнастый // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Белгород: БГУ, 2015. – № 34/1. – С. 137–152. –Available at: https://goo.gl/53P4hV
16. Костенко Ю.Т. Прогнозирование технического состояние систем управления / Ю.Т. Костенко, Л.Г. Раскин. – Х.: Основа, 1996. – 303 с.
17. Азаренков Н.А. Кинетическая теория колебаний параметров поточной линии / Н.А. Азаренков, О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. – 2014. – № 12. – С. 36–43. –Available at: https://goo.gl/M913ju
18. Ходусов В.Д. Использование методов физической кинетики для исследования колебания параметров поточной линии / В.Д.Ходусов, О.М.Пигнастый // Восточно-европейский физический журнал. – Харков: ХНУ. – 2014. – Vol.1. – №4. – С. 88–95. –Available at: https://goo.gl/Sprxuh
19. Демуцкий В.П. Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок / В.П. Демуцкий, В.С. Пигнастая, О.М. Пигнастый. – Харьков.: ХНУ, 2003. – 272 с.
20. Пигнастый О.М. Теория подобия технологических процессов / Н.А. Азаренков, О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я": тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції (MicroCad 2011), (м. Харків, 01-03 червня 2011 р.). – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – Ч. 4. – С. 360. – Available: https://goo.gl/PRCNJn – DOI: 10.13140/RG.2.2.25066.52163
21. Пигнастый О.М. Характерные числа в моделях описания производственных систем. / О.М. Пигнастый. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ "ХАИ", 2006. – Вып. 31. – С. 242 – 252.
22. Пигнастый О. М. Статистическое обоснование энтропийных закономерностей в моделях управления технологическими процессами / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. - Харків: ХНУ. - 2012. № 1037. - С. 168-174.
23. Пигнастый О.М. Статистическое обоснование и вывод балансовых уравнений для двухуровневой модели производственной поточной линии // О.М. Пигнастый // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харков: НПП "Технологический центр". – 2016. – Т. 5. – № 5 (83). – С. 17–22.
24. Раскин Л.Г. Метод решения задачи континуального линейного программирования с использованием ортогональных систем функций / Л.Г. Раскин, О.М. Пигнастый // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – Харків: НАУ "ХАИ". – 2015. – № 3(73). – С. 90–95.
25. Пигнастый О.М. Современные аспекты энтропийного моделирования технологического процесса / О.М.Пигнастый // Математическое и имитационное моделирование систем МОДС 2012: Сборник докладов 7-ой международной научно-практической конференции с международным участием (25-28 июня 2012 г.). – Чернигов, 2012. – С. 159–163.