

**Курс лекций по дисциплине**

**«ТЕОРИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПОТОКА»**

Лектор: к.т.н., доц. кафедры МАПП

***Овсянников Виталий Юрьевич***



# Разделы дисциплины:

- **Организация технологического потока**
- **Строение технологического потока**
- **Функционирование технологического потока**
- **Развитие технологического потока**
- **Прогнозирование технологического потока**



# Системный подход к анализу пищевых производств

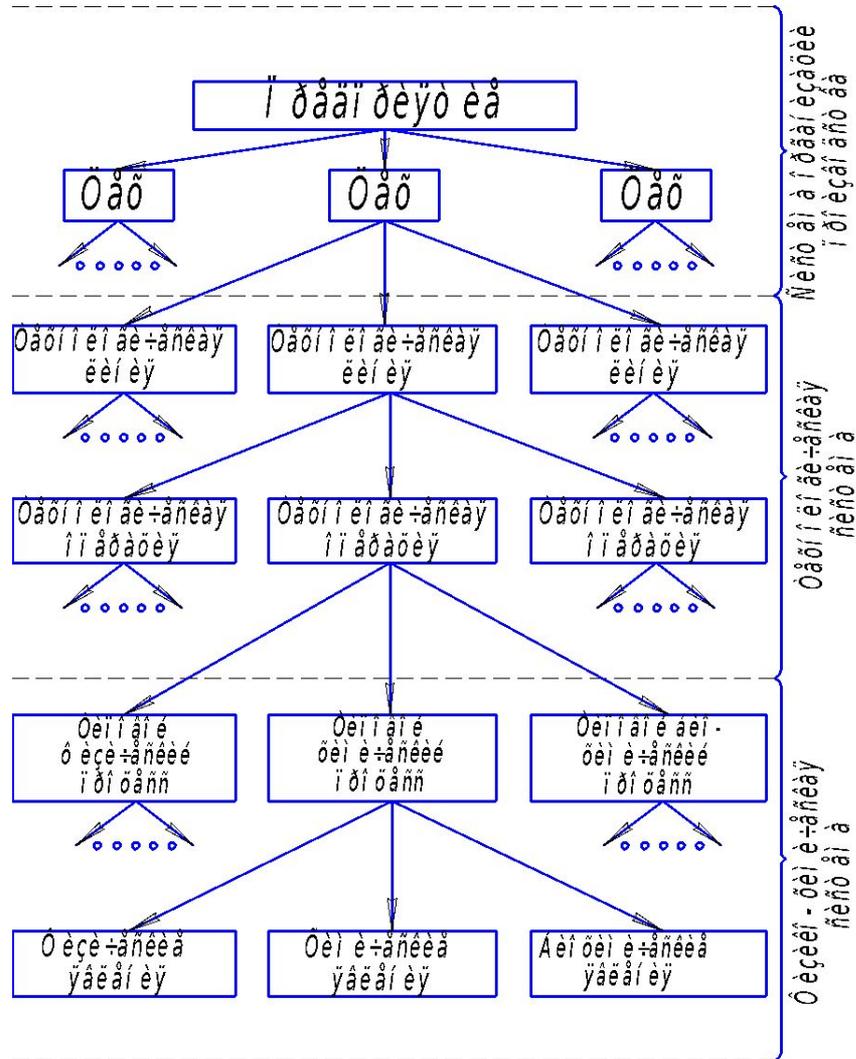
Процессы в поточной линии, по существу, являются одним большим процессом (поток). Поэтому оптимизация процесса только в одном аппарате или одной машине без учета связей с процессами в другом оборудовании часто приводит к тому, что весь технологический поток далек от оптимального режима. Изучение процессов в целой линии обуславливает необходимость разработки методов их исследования на основе положений общей теории систем.



Рациональным направлением исследований с целью развития технологических линий перерабатывающих производств следует считать анализ и синтез системы процессов, выявление факторов, ведущих к распаду ее как органичного целого, и устранение этих факторов, пользуясь известными научными методами. Игнорирование концепции развития технологического потока при проектировании линий приводит к созданию нежизнеспособных систем.



Современное пищевое предприятие как система большого масштаба состоит из взаимосвязанных подсистем, между которыми существуют отношения соподчиненности с тремя основными ступенями качества систем.



Системы пищевого предприятия



**Высшая ступень иерархической структуры пищевого предприятия** – это система оперативного управления работой всех цехов, планирование запасов сырья и реализации готовой продукции.

**Основу средней ступени** составляют технологические процессы в поточных линиях как совокупность специфических технологических операций.

**Низшую ступень** образуют типовые процессы пищевой технологии в определенном машинно-аппаратурном оформлении.



# Системность технологического потока

**С и с т е м н ы й   п о д х о д** ориентирует на поиск объединяющих, интегрирующих свойств целого, на учет взаимозависимости его частей и позволяет свести различные задачи познания частей к единой комплексной проблеме, наметить генеральную линию ее решения и тем самым решить задачу познания и принципиального изменения целого. Современная наука и практика интерпретируют окружающую нас действительность не как отдельные, изолированные друг от друга объекты и процессы, а как определенные системные образования.



**Системный анализ технологического потока** углубляет, специализирует и систематизирует наши знания, но вместе с тем подготавливает условия для осуществления системного синтеза дифференцированных знаний. Такое комплексирование дифференцированного знания является сегодня одним из необходимых и плодотворных направлений дальнейшего развития пищевой технологии



# Технологический поток как система процессов

Технологический поток представляет собой совокупность технологических операций. Он обладает новым, системным качеством, которого не имеет ни один из образующих его элементов. Системное качество заключается в гораздо более эффективном функционировании комплекса машин и аппаратов, нежели работа не объединенных в линию орудий труда. В линии эффективность технологических преобразований достигается в результате исполнения в высокой степени совершенства отдельных операций, что ведет к неизвестной до этого стабильности производства.



# Терминология системного подхода

- Система - это упорядоченное определенным образом множество разнородных элементов (по крайней мере, двух), взаимосвязанных между собой и образующих некоторое целостное единство, свойства которого больше суммы свойств составляющих его элементов
- Элементами называют объекты, которые в совокупности образуют систему
- Подсистема - совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, реализующих определенную группу функций системы
- Структура системы - это сеть отношений, т. е. определенная упорядоченность связей между элементами системы
- Связи системы - это взаимодействия ее элементов, обеспечивающие возникновение и сохранение структуры и целостных свойств системы. Связи осуществляют обмен веществом, энергией и информацией между элементами системы и между системой и внешней средой.
- Целостность системы определяется как совокупность элементов, взаимодействие которых обуславливает наличие новых качеств системы, не свойственных образующим ее частям



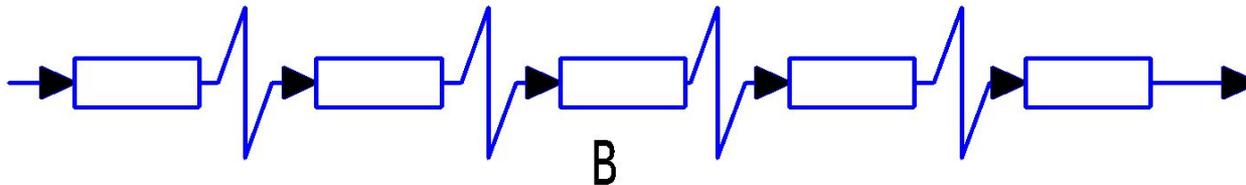
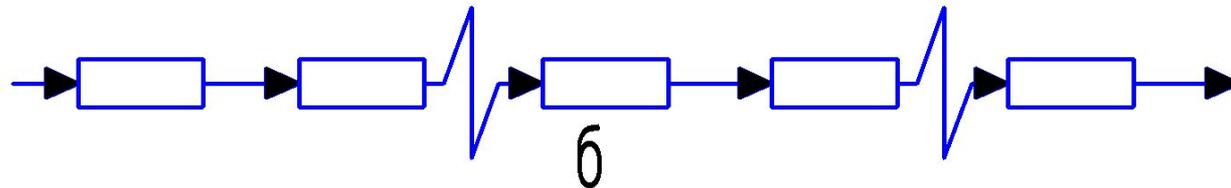
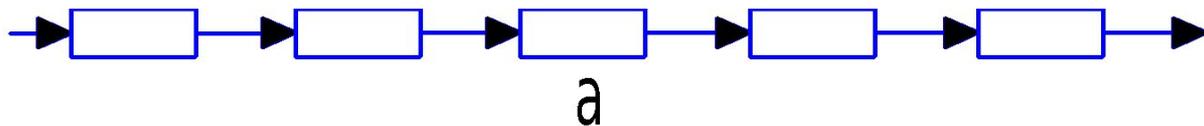
# Организация технологического потока будущего

Строение технологического потока определяется связями между его отдельными операциями.

- поток с жесткой связью предусматривает жесткую связь между выходом каждой предыдущей и входом каждой последующей операции; естественно, что длительность цикла каждой операции должна быть одинаковой или кратной циклу ведущей операции или группы их
- поток с полужесткой связью характеризуется тем, что в нем имеются группы операций с жесткой связью лишь внутри самих себя; между собой эти группы имеют гибкие связи в виде операций хранения; конструктивно операция хранения реализуется в накопителях, бункерах, емкостях, ветвях конвейеров и т. д.;
- поток с нежесткой (гибкой) связью отличается тем, что операция хранения обычно бывает между каждыми двумя технологическими операциями



# Схема строения технологических потоков с различными связями



а - жесткой; б - полужесткой; в - нежесткой



По форме технологические потоки могут быть неразветвленные и разветвленные, причем последние имеют сходящиеся, расходящиеся и параллельные ветви.

В простейшем случае операции составляют одну цепочку - неразветвленный поток. Такой поток предназначен для выработки преимущественно из одного вида сырья, одного вида продукции (цельного молока, ириса, леденцовой карамели, патоки из крахмала, макаронных изделий и т. д.).

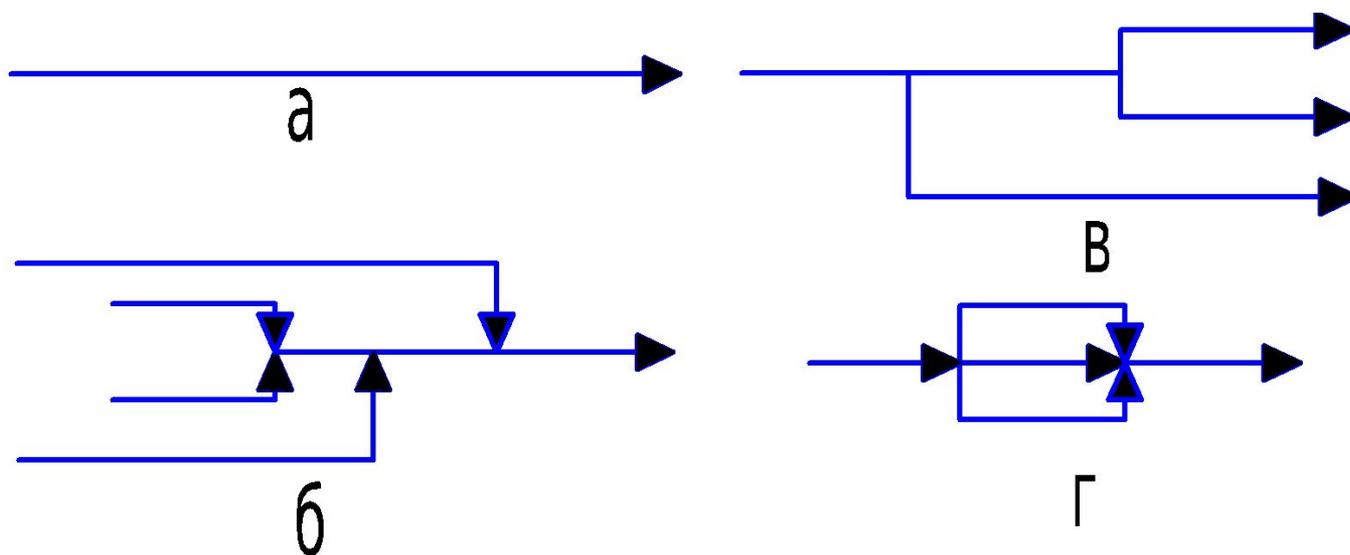
Разветвленный сходящийся технологический поток предназначен для получения из нескольких видов сырья одного вида продукции (хлеба, сыра, пирожных и тортов, карамели с начинкой, конфет "Ассорти" и т. д.).

Разветвленный расходящийся технологический поток возникает при выработке из одного вида сырья нескольких видов конечного продукта (белых столовых виноматериалов из винограда, муки первого и второго сортов при помоле пшеницы, шоколада, какао-масла и какао-порошка при переработке какао-бобов и т. д.).

Технологический поток с параллельными ветвями образуется в случае одновременного параллельного функционирования ряда идентичных операций из-за недостаточной производительности оборудования на данном участке линии.



# Схема форм технологических ПОТОКОВ



а - неразветвленный; б - разветвленный сходящийся;  
в - разветвленный расходящийся; г - разветвленный с  
параллельными ветвями



# Идеальный технологический поток

Идеальный технологический поток сплошной среды характеризуется тремя параметрами: скоростью  $v$ , м/ч, площадью поперечного сечения  $s$ , м<sup>2</sup>, а также плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>. Произведение этих параметров определяет его производительность  $\Pi$ , кг/ч:

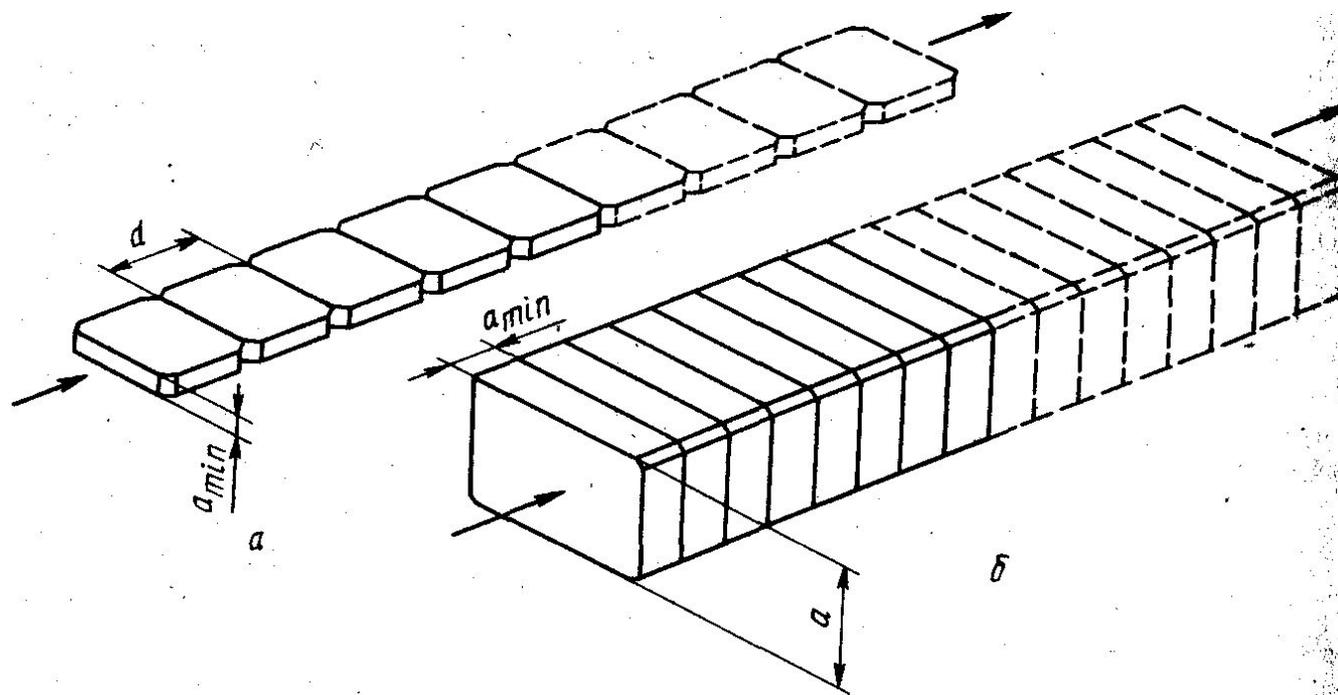
$$\Pi = v \cdot s \cdot \rho$$

Идеальный технологический поток должен иметь:

- 1. Среднюю скорость в течение всего времени функционирования и на всем протяжении, равную максимально возможной с точки зрения физической, химической и микробиологической природы обрабатываемого материала:
- 2. Максимальное поперечное сечение на всем своем протяжении;
- 3. Максимальную плотность в направлении его вектора скорости.



# Схема технологических потоков дискретных объектов обработки



а - с неоптимальным расположением объектов;

б - с оптимальным расположением объектов (поток с максимальной плотностью)



# Технические проблемы развития технологических систем

**Первая проблема** - осуществление одинаковой производительности на всех операциях, объединенных в технологический поток. При неодинаковой производительности каждой операции межоперационная передача объектов обработки превращается из простого перемещения их по одной и той же траектории в распределение на несколько ручьев при переходе от более производительных машин к менее производительным или, наоборот, в слияние нескольких ручьев в общий поток.



**Вторая проблема** – сохранение коэффициента использования машин при увеличении числа объединенных в технологический поток операций. Эта проблема состоит в том, что при объединении существующих машин и аппаратов в линию остановка каждой из них приводит к остановке всей линии и, следовательно, к снижению коэффициента ее использования. Очевидно, что, начиная с некоторого числа операций, нецелесообразен переход от отдельных машин к линиям. Решение проблемы состоит, с одной стороны, в сокращении и упрощении технологии, а с другой – в повышении надежности оборудования.



**Третья проблема** – универсальность машин и аппаратов: обеспечив ее, можно обрабатывать сырье с различными физико-механическими и биохимическими свойствами и выпускать изделия разной формы. Сущность проблемы заключается в том, что машины, аппараты, а тем более линии, обеспечивают обычно производство лишь одного конкретного изделия данной геометрической формы из одного набора компонентов сырья. Решение проблемы – создание линий, на которых можно одновременно изготавливать различные номенклатуры изделий и полностью устранить частые переналадки линий

**Четвертая проблема** – непродолжительность времени выпуска конкретного продукта, обусловленная малой потребностью или необходимостью большого ассортимента. Ее решение – полное устранение потерь рабочего времени при переходе к выпуску на линии нового продукта.

**Пятая проблема** – обеспечение рентабельности технологического потока. Переход к идеальному потоку часто принципиально возможен, но экономически нецелесообразен, так как затраты могут быть больше экономического эффекта от эксплуатации. Решение проблемы – создание таких машин, производительность которых может быть любой и определяться экономической окупаемостью.



# Операция как составная часть потока

Технологические операции выполняют две функции: обработку объекта (технологический процесс) и подачу объекта обработки в рабочую зону (транспортный процесс). Комбинация технологического и транспортного процессов приводит к формированию четырех классов операций.



# Классы технологических операций

## Операции I класса

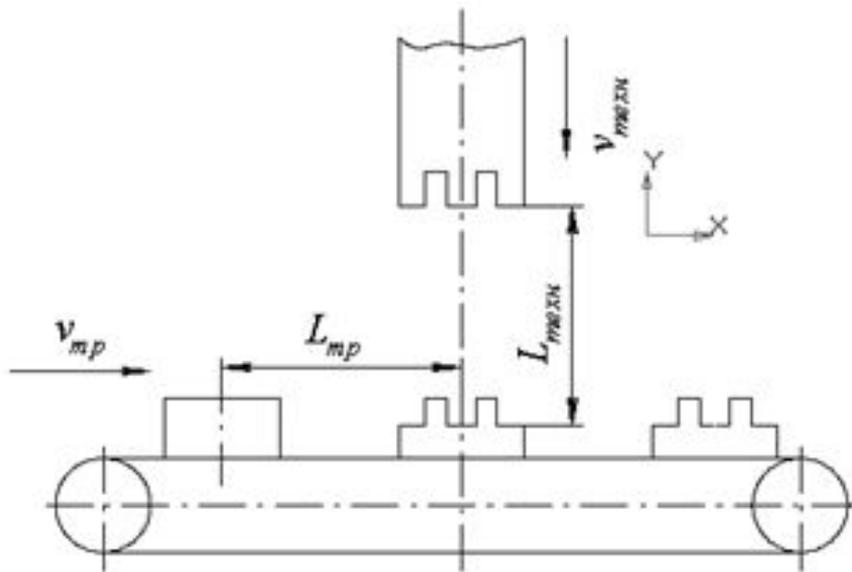
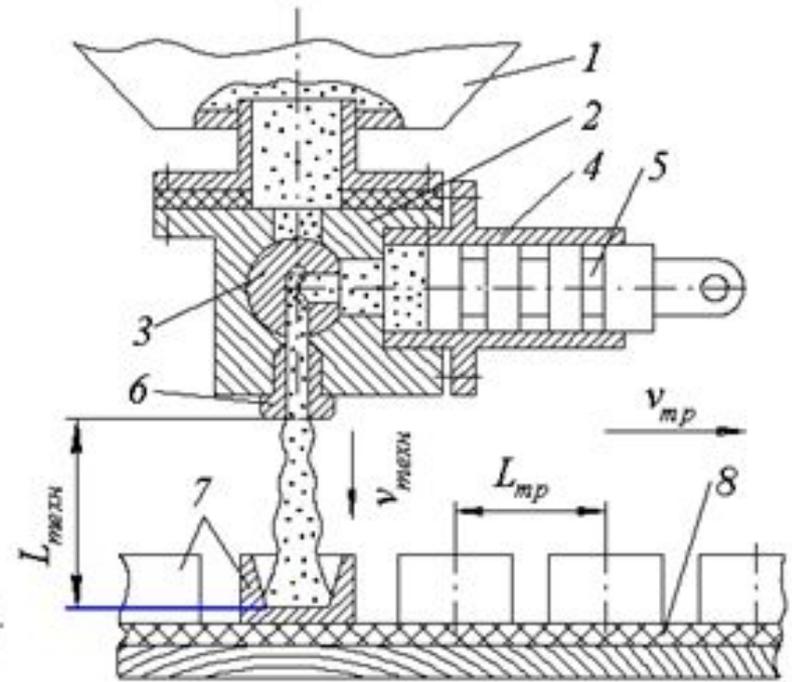


Схема операции I класса.



Устройство для дозирования и формования массы в отливочной машине (операция I класса):

1 – бункер; 2 – корпус отливочной головки; 3 – золотник; 4 – мерный цилиндр; 5 – поршень; 6 – насадка; 7 – форма; 8 – ленточный конвейер



# Операции II класса

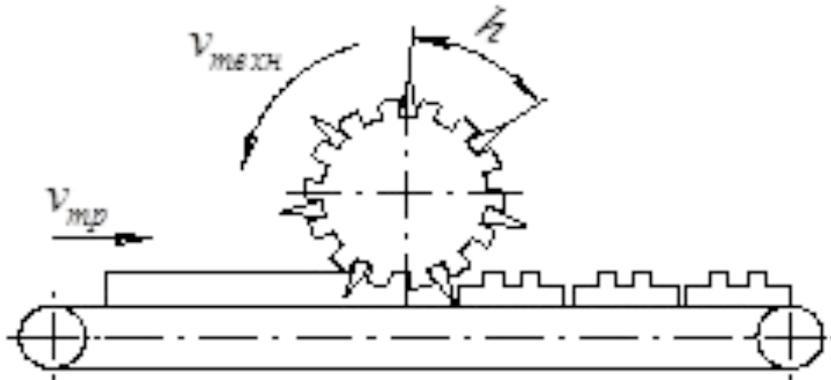
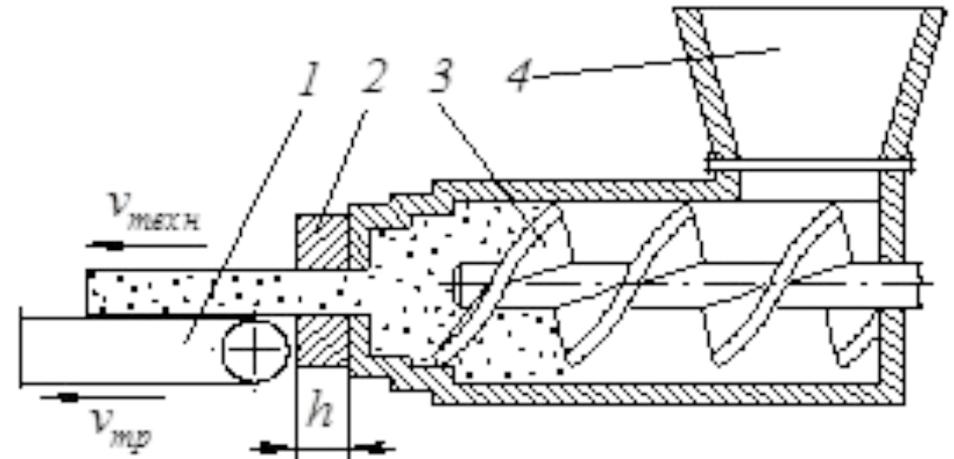


Схема операции II класса.



Устройство для формования массы шнековым нагнетателем (операция II класса): 1 – ленточный конвейер; 2 – матрица; 3 – шнек; 4 – бункер



# Операции III класса

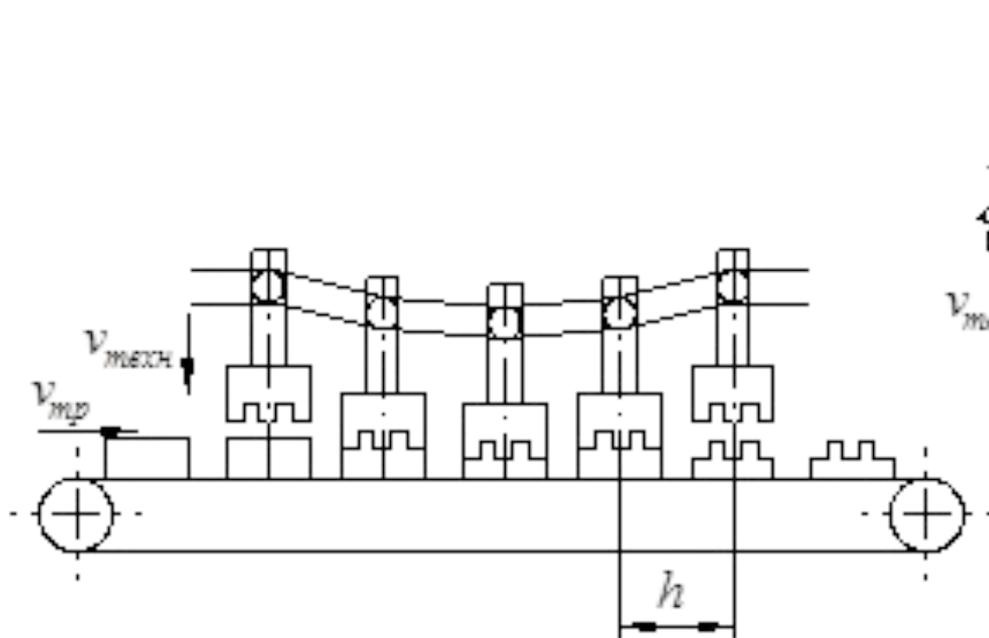
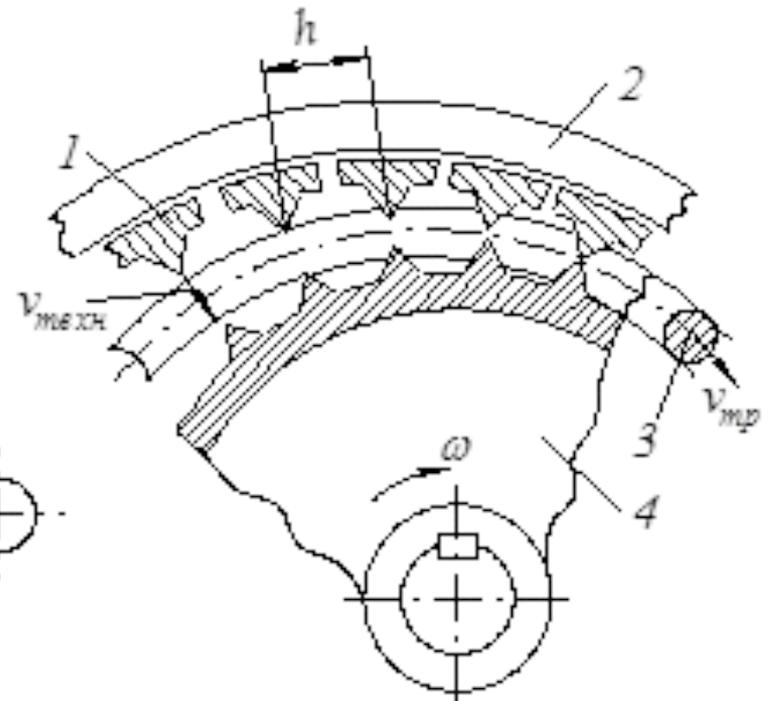


Схема операции III класса



Устройство для дозирования массы продукта в виде жгута круглого сечения в роторной режущей машине (операция III класса):

- 1 – откидной нож;
- 2 – неподвижная направляющая;
- 3 – жгут продукта;
- 4 – ротор



# Операции IV класса

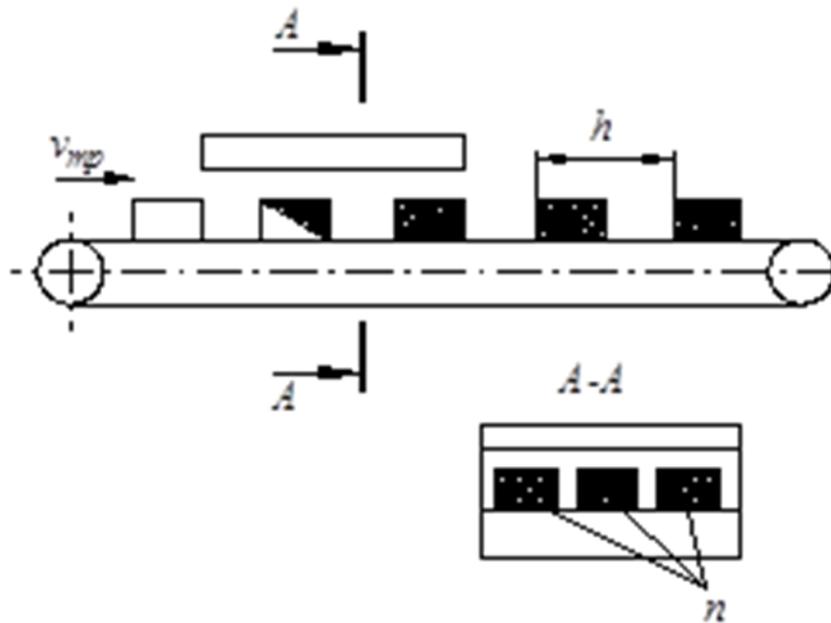
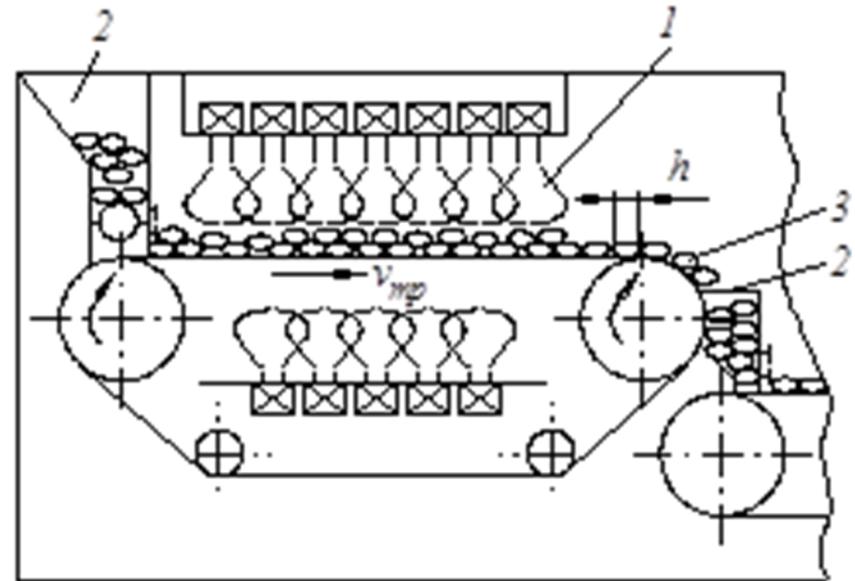


Схема операции IV класса



Устройство для сушки  
продукта (операция IV класса):  
1 – генератор инфракрасного излучения;  
2 – воронка; 3 – продукт



# Эволюция технологического потока

**Перспектива развития операции I класса.** Производительность машин, реализующих операции 1 класса, обусловлена технологическими параметрами операции и динамическими возможностями механизма перемещения пищевой среды в зону и из зоны обработки.

**Перспектива развития операции II класса.** Существенным отличием операций II класса является то, что вследствие совмещения во времени технологический и транспортный процессы не прерывают друг друга и могут происходить непрерывно с постоянной скоростью.

**Перспектива развития операции III класса.** В этих операциях, имеющих важное значение при создании линий, также важен характер соотношения между производительностью, динамическим режимом работы машин и технологическим режимом процесса.

**Перспектива развития операций IV класса.** Операции IV класса также позволяют создавать машины (аппараты) произвольной производительности.



# Роторный технологический поток

При роторной схеме рабочие органы монтируются на жёстких роторах, при роторно-конвейерной схеме – на гибких замкнутых транспортных системах-конвейерах.

Эти две схемы машин имеют принципиальные различия, которые определяют их важнейшие технические возможности. Роторная схема машин соответствует начальной стадии развития операций III и IV классов и обладает ограниченными возможностями как по технико-экономическим показателям, так и по диапазону применения. Роторно-конвейерной схема машин соответствует развитой форме этих операций. Поскольку такие операции первоначально были реализованы в форме роторных машин и линий, то многие относящиеся к ним технические решения сохраняются и в роторно-конвейерных машинах и линиях.



# Системный анализ и системный синтез технологического потока

**Системный анализ** - это логический способ воспроизведения в мышлении расчлененной объективно существующей целостной системы.

Сущность анализа - расчленение целого на образующие его компоненты, части, выделение и изучение функций каждой из частей. Системный объект расчленяют в соответствии с присущими ему закономерностями, его функциями и структурой, с учетом состава компонентов и внутрисистемных связей. Смысл анализа - в определении места и роли каждого элемента в целостной системе.

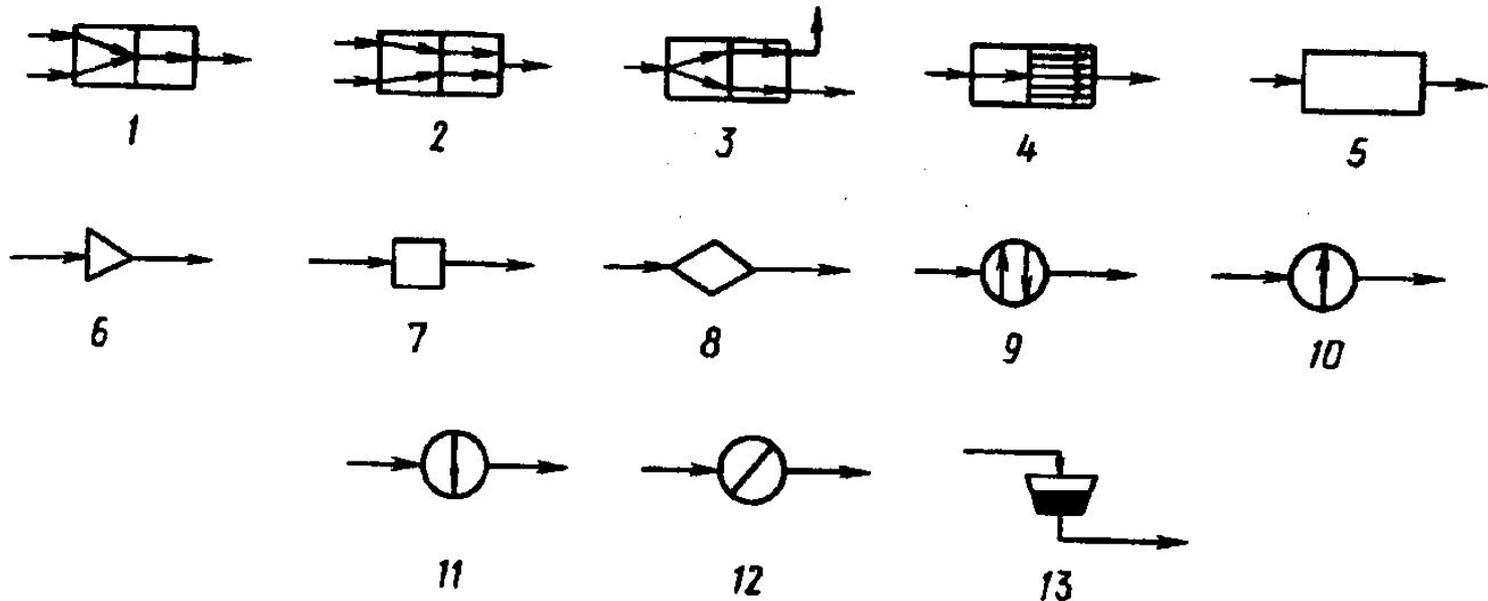
**Синтез** - это физическое или мысленное воссоединение частей, границы которых были установлены в процессе анализа.

Синтез, так же как анализ, представляет собой сложный многоэтапный процесс. Многоэтапность синтеза обусловлена многоуровневостью сложных систем, их непрерывным развитием.

Рациональный метод анализа и синтеза технологических систем - разработка операторных моделей.



# Условные обозначения технологических процессов обработки сред (процессоры)



1-соединение без сохранения поверхности раздела (смешивание сред); 2-соединение с сохранением поверхности раздела (образование слоя); 3-разделение на фракции; 4-измельчение; 5-сложный процесс преобразования (комплекс физических, химических и микробиологических процессов); 6-дозирование; 7-формообразование; 8-ориентирование (в частности, предметов); 9-термостатирование (поддержание постоянной температуры); 10-нагревание; 11-охлаждение; 12-изменение агрегатного состояния; 13-хранение



# Моделирование технологического потока

Моделируя реальный объект в виде системы, исследователь выделяет в процессе познания определенную структуру объекта и придает ей требуемое значение, которое является отражением взаимосвязи ее элементов.

При этом исследователь рассматривает объект в качестве системы, если необходимо исследовать объект в его целостности, а не как механическую сумму составляющих.

Модель представляет собой упрощение, определенным образом схематизированное отражение моделируемой системы. Это упрощение может выражаться в значительном сокращении в модели числа компонентов оригинала с сохранением лишь некоторых его общих морфологических черт, в сокращении числа взаимосвязей компонентов оригинала и упрощении их внутреннего содержания, в схематизации пространственного порядка и следования во времени присущих оригиналу компонентов и процессов и т.д.



# Моделирование строения технологического потока

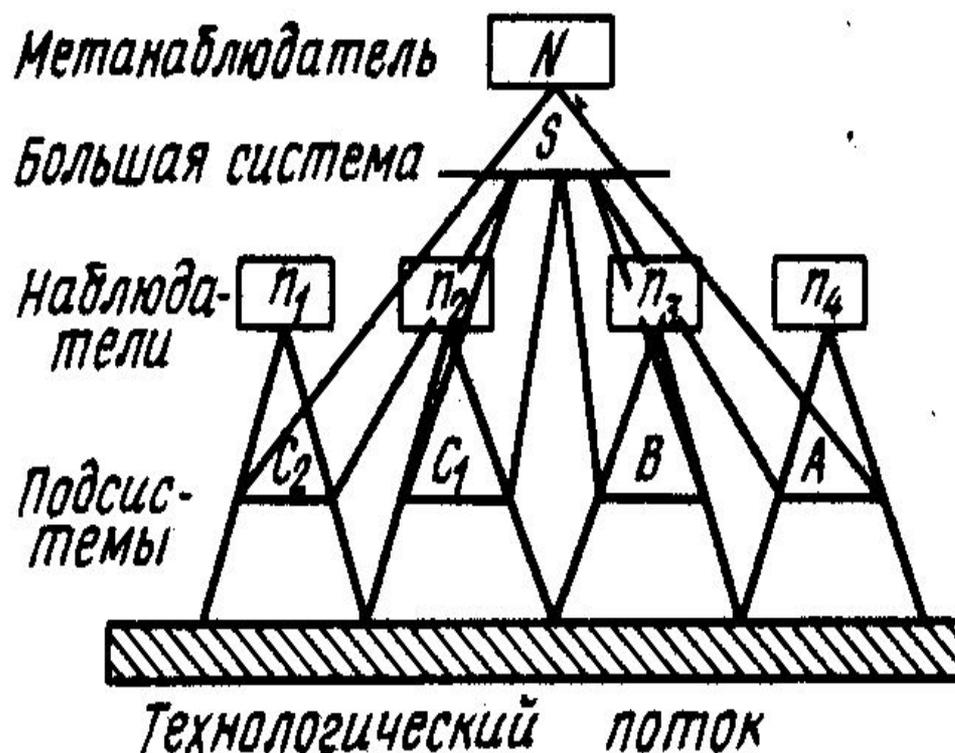


Схема системного подхода к моделированию строения технологического потока



Моделирование потока целесообразно тогда, когда исследователь должен решить сложную проблему, т. е. разрешить противоречие между необходимостью развития поточной линии и невозможностью это сделать с помощью современной техники и технологии.

Моделирование строения технологического потока как системы имеет своей конечной целью выявление его механизма функционирования и развития.

При моделировании строения сложный объект качественно расчленяется на ряд простых, а в процессе моделирования его функционирования взаимодействия этих простых объектов выражаются количественно. Разрешение сложного технического противоречия распадается на ряд задач, которые имеют хорошо отработанные методы решения.



# Моделирование функций технологического потока

Закономерности функционирования системы в целом и ее частей отражают математические модели.

В математическом моделировании технологических процессов пищевого производства сформировалось два направления: теоретическое и статистическое.

Теоретическое исследование базируется на применении различных математических методах

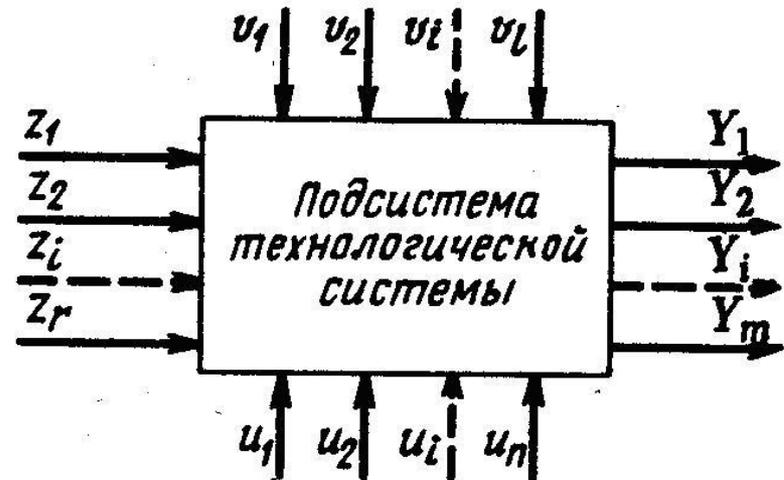
Статистическое исследование стохастических процессов имеет два подхода. Первый из них - регрессивный анализ - базируется на обработке результатов так называемых "пассивных" экспериментов. Второй - на обработке результатов «активных» экспериментов.

При оптимизации процессов все они сводятся к тому, чтобы найти минимум или максимум поверхности, описываемой уравнением целевой функции.



# Кибернетическое моделирование технологического потока

$z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) – входные параметры;  
 $u_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – управляющие параметры;  
 $v_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ) – возмущающие параметры;  
 $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) – выходные параметры



Параметрическая схема технологического процесса в подсистеме



Чтобы процесс имел возможность функционировать, он должен обладать, по крайней мере, одним входом и одним выходом. Функционирование процесса математически представляет собой преобразование входного вектора в выходной.

Закон преобразования входных факторов в выходной определяет является процесс детерминированным или стохастическим. Кроме прямой трансформации можно ввести обратную трансформацию

При обратной трансформации по значениям выходов процесса можно сделать заключение о состоянии его входов.

Кибернетическое моделирование устанавливает количественные и качественные связи между параметрами процесса и сводится к тому, чтобы теоретически или экспериментально найти оператор трансформации и в дальнейшем использовать его для изучения сущности процесса, а также для обратной трансформации при управлении им.



# Уровень целостности технологической системы

Направление развития машинных технологии определяет количественная оценка уровней организации бинарных систем, фактором целостности которых является стабильность процессов их составляющих.

Стабильность  $i$ -й подсистемы технологии как системного объекта

$$\eta_i = 1 - \frac{H_i}{H_{\max}}$$

где  $H_i$  – текущая информационная энтропия  $i$ -й подсистемы, соответствующая данному распределению значений показателя выхода подсистемы;  $H_{\max}$  – максимально возможная энтропия, соответствующая закону равномерного распределения.

Как известно, информационная энтропия

$$H_i = -\sum P(x_i) \log P(x_i)$$

где  $P(x_i)$  – вероятность попадания случайной величины в интервал  $(x_{(i-1)}; x_i)$ .

Для случая с двумя возможными исходами

$$H = -P \log_2 P - (1 - P) \log_2 (1 - P)$$

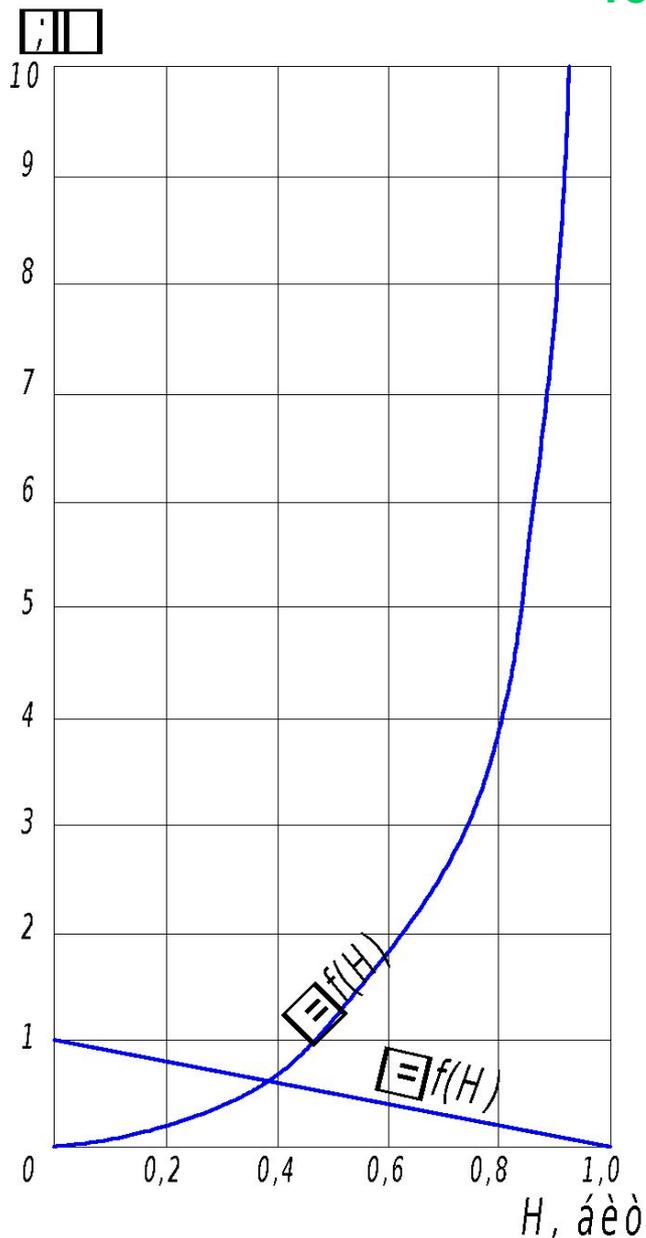
Выбор основания логарифмов несуществен, так как от него зависит только масштаб измеряемой величины. Максимальное значение энтропия достигает тогда, когда  $P_1 = P_2 = \dots = P_n = 1/n$ . Минимальное значение энтропия имеет тогда, когда одно из значений  $P = 1$ , а остальные  $(n-1)$  значения вероятности составляют  $P = 0$ .

В соответствии с формулой (4.3) максимально возможная энтропия, (бит)

$$H_{\max} = -0,5 \log_2 0,5 - 0,5 \log_2 0,5 = 1$$



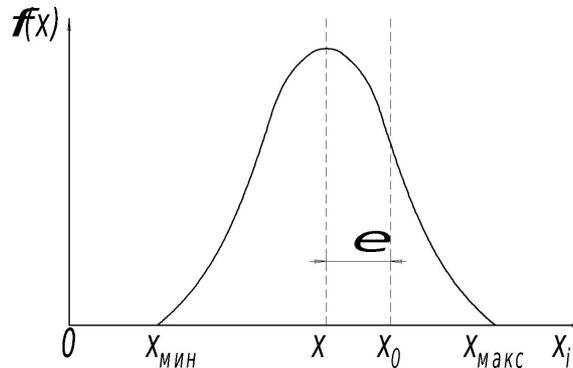
## Функция потенциала развития $\xi$ и функция стабильности $\eta$ технологической системы



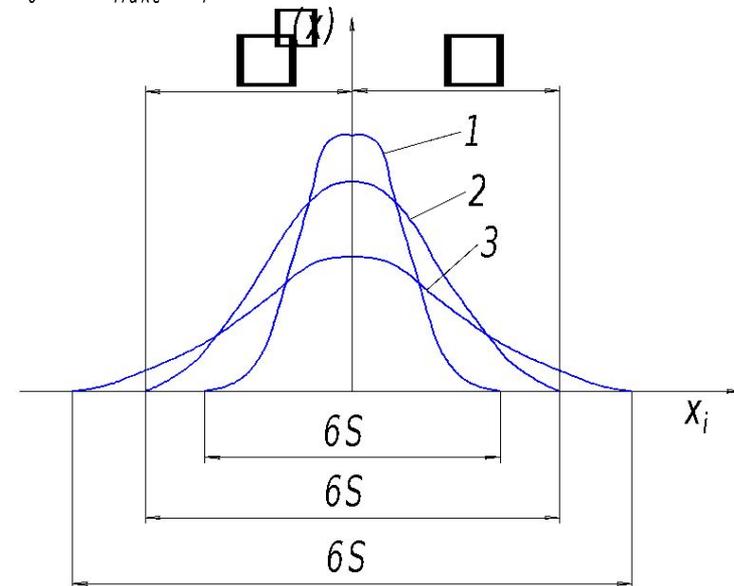
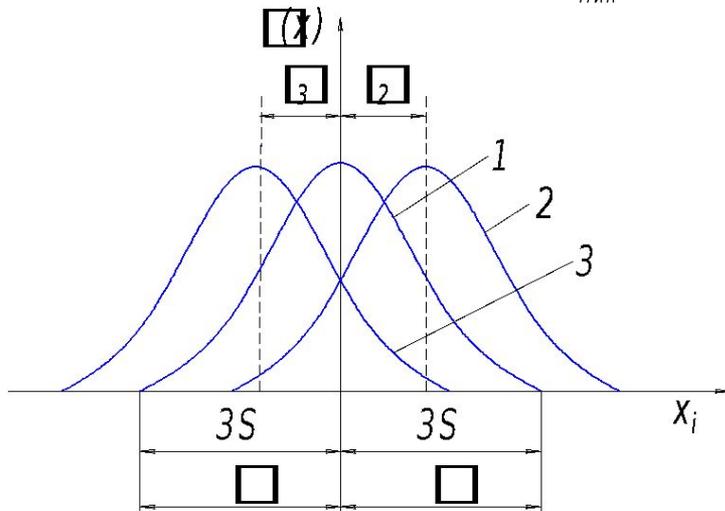
При таком значении энтропии своего выхода подсистема сохраняет достаточную стабильность и определенность и одновременно оставляет возможность для перемен и поддержания темпов развития. График совмещенных функций дает ясное представление о том, что развитие целесообразно не при всякой стабильности функционирования подсистем, а лишь при  $\eta = 0,618$ . Другими словами, технологическая система, подсистемы которой имеют среднюю стабильность своих выходов  $0,618 >> \eta >> 0,618$ , в сущности, не должна и не может целесообразно развиваться: в первом случае из-за чрезвычайно низкой организации производства, а во втором, наоборот, – по причине чрезмерной заорганизованности.



# Точность процессов



Кривая плотности вероятности параметра продукции



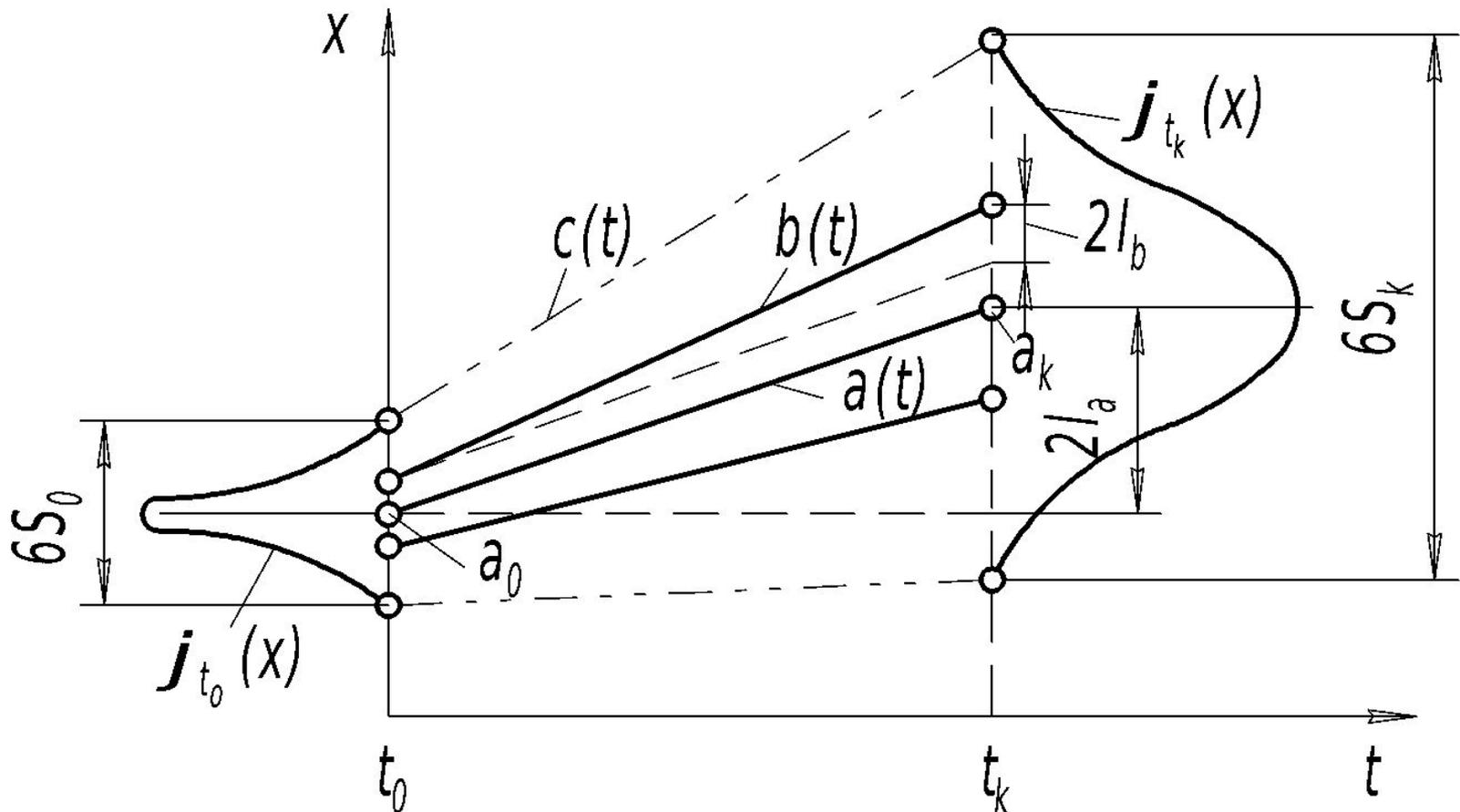
Кривые нормальной плотности вероятности параметра продукции при различных значениях коэффициента смещения: 1 –  $E = 0$ ; 2 –  $E > 0$ ; 3 –  $E < 0$

Кривые нормальной плотности вероятности параметра продукции при различных значениях коэффициента точности: 1 –  $T > 1$ ; 2 –  $T = 1$ ;

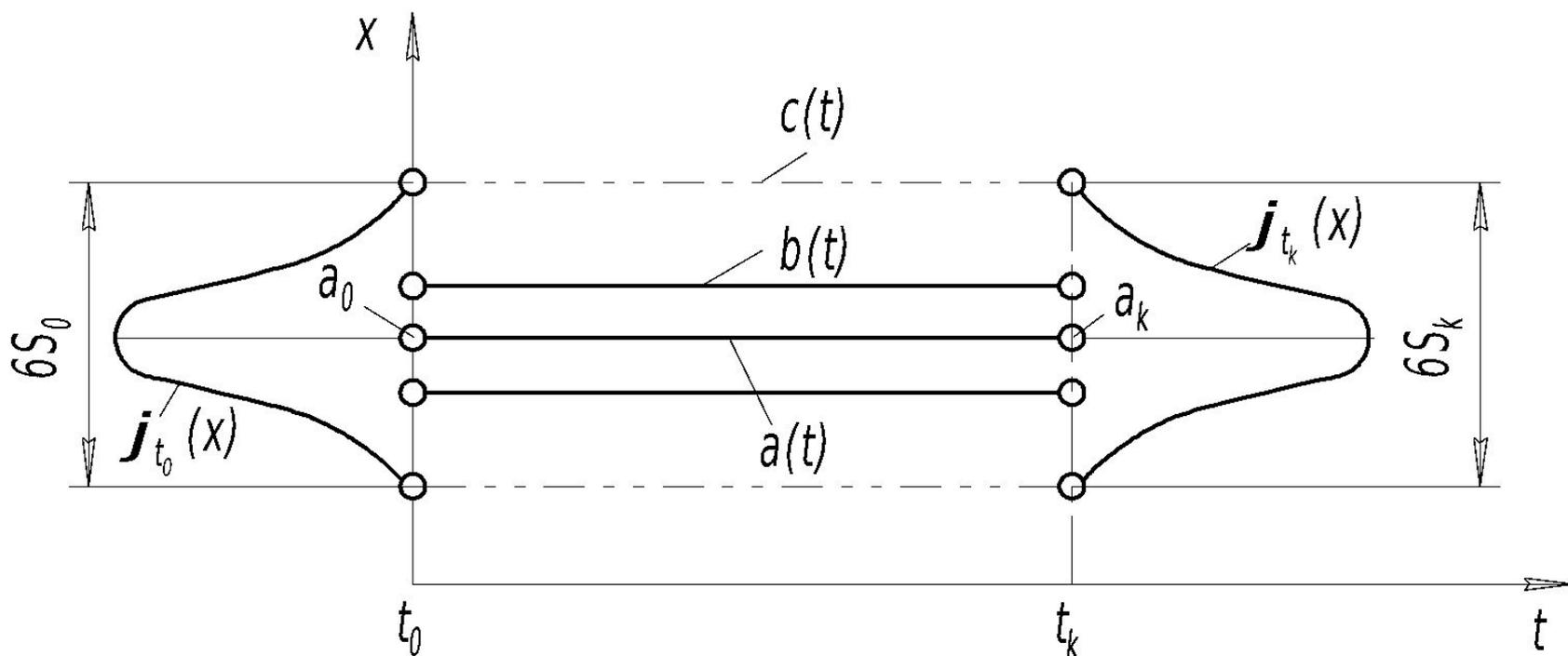


# Устойчивость процессов

Точностная диаграмма функционирования процесса



# Точностная диаграмма идеально устойчиво функционирующего процесса



# Потенциал развития технологической системы

В процессе развития технологических систем повышается их уровень целостности, проявляющийся в функциональном и структурном отношениях. Функциональная целостность системы рассматривается в ее отношении к внешней среде, структурная – в отношении к ее составным частям.

Повышение функциональной целостности технологических систем выражается в расширении функциональных возможностей системы, соответствующих требованиям внешней среды при минимальных усложнениях ее структурной организации.

Повышение структурной целостности достигается уменьшением числа элементов и упрощением связей между ними.

В процессе прогрессивного развития технологической системы повышается ее целостность и сама она может перейти в подсистему более сложной системы.

Плохо организованная система вследствие огромного количества саморазрушающих факторов очень затрудняет работу исследователя по ее усовершенствованию. Но и чрезмерно организованная система с высоким уровнем целостности снижает творческую активность исследователя.

