

ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ:

закономерности
развития



А. Ф. Каменев

ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

закономерности развития



Ленинград
«Машиностроение»
Ленинградское отделение
1985

Рецензент акад. АН СССР К. В. Фролов
Научный редактор д-р техн. наук А. А. Денисов

Каменев А. Ф.

**Технические системы: закономерности развития.— Л.:
Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985.— 216 с., ил.**

В монографии рассмотрены закономерности развития технических систем, выявленные автором на базе ретроспективного причинно-следственного анализа изменения статистических данных по главным параметрам бумагоделательных машин и других видов техники. На основе полученной аналитической модели предложена методика прогнозирования развития главных параметров технических систем.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов, занимающихся исследованием и разработками современных средств производства.

Табл. 17, ил. 75, библи. 79 назв.

К $\frac{2702000000-914}{038(01)-85}$ КБ-8-9-1985

Достигнутый человечеством к концу XX в. уровень развития общественного производства обусловлен прежде всего завоеваниями науки и техники, ставшими основной движущей силой этого процесса. Современная наука настоятельно требует осмысления любых изучаемых процессов и явлений с диалектических позиций. Только такой подход позволяет не фрагментарно, а широкомасштабно, не абстрактно, а с глубоким анализом причин и следствий познавать сущность, характер и динамику изменения во времени предмета исследований. Без этого невозможно понять истинный характер течения глобальных народнохозяйственных процессов, процессов развития техники, и в первую очередь машиностроения как наиболее сложной и масштабной отрасли производства.

Планирование развития как отдельных отраслей, так и народного хозяйства страны в целом всегда предполагает интенсификацию роста количественных и качественных показателей общественного производства. Это, в свою очередь, требует глубокого понимания объективных закономерностей развития орудий труда, которые в настоящее время представляют собой сложные технические системы, и закономерностей развития производительных сил и производственных отношений. Отсутствие таких знаний неизбежно порождает ситуации, связанные с недостаточно эффективным использованием орудий труда в народном хозяйстве.

Потребность в системном анализе сложных процессов вызвана стремлением специалистов и организаторов производства найти пути рационального использования ресурсов, вовлекаемых в народнохозяйственную деятельность, с целью получения максимального эффекта. В арсенале науки имеются методы решения этих задач, базирующиеся, как правило, на эмпирических основах, на использовании коллективного опыта и интуиции специалистов. Широко применяемые на практике методы коллективной генерации идей, дерева целей, сценариев, метода Дельфи, морфологического подхода и т. п. основаны на выявлении и обобщении мнений опытных специалистов и далеки от совершенства.

Главная же трудность заключается в составлении, с одной стороны, напряженных, а с другой — реальных планов развития общественного производства на отдаленные и даже относительно близкие периоды. Характерным в этом смысле является машиностроение, где все сказанное выше проявляется в основном в неудовлетворительном освоении на практике созданных мощностей технологических потоков, производительности и других технических параметров машин.

Если запланированная производительность сложных систем не может быть достигнута вообще или если проектные мощности

осваиваются с запозданием, через длительное время, то подобные системы не могут быть названы эффективными. Причины неудач сводятся к тому, что запланированный проектный уровень производительности оборудования может быть завышен и не подкреплен как техническими возможностями самих конструкций, так и организационно-техническими мероприятиями производства, где они эксплуатируются. В этом случае запланированная производительность систем окажется завышенной и недостижимой.

Возможна и противоположная ситуация, когда проектная производительность вновь вводимых в эксплуатацию систем или отдельных машин является заниженной. В этом случае они не отвечают современному уровню по техническим параметрам, и достижения науки и техники не используются должным образом. Оба эти явления влекут за собой большие экономические потери в народном хозяйстве и потому определяют актуальность проблемы овладения объективными закономерностями развития сложных технических систем, с которыми имеет дело современное общество.

Автор предлагаемой монографии ставит своей целью выяснить и сформулировать закономерности развития технических систем и разработать математические модели, а также прикладные методы решения задач их развития. Эта попытка базируется на опыте многолетних исследований самого автора и на работах отечественных и зарубежных ученых. Автор в основном опирался на результаты исследований закономерностей развития бумагоделательных машин, которые являются типичными представителями сложных технических систем. Высокая эффективность самого технологического процесса производства бумаги и совершенство конструкций машин, реализующих этот процесс, были отмечены еще К. Марксом при исследовании законов развития производительных сил и производственных отношений в капиталистическом обществе. Маркс отмечал: «Примером как непрерывности производства, так и проведения автоматического принципа может служить современная бумажная фабрика» [1, с. 392].

При изучении закономерностей развития бумагоделательных машин автор настоящей монографии использовал обширный статистический материал и имел возможность провести причинно-следственный анализ развития этих систем от момента зарождения вплоть до наших дней. Вместе с тем в книге обобщены некоторые статистические материалы по развитию технических систем других видов. Однако такие материалы использовались лишь в случаях, когда их адекватность выявленным закономерностям и теоретическим положениям не вызывала сомнений.

Понимая важность, сложность и масштабы затронутых проблем, автор не претендует на исчерпывающее решение их в рамках одной работы. Поэтому критические замечания читателей будут приняты с благодарностью. Их следует направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, Ленинградское отделение издательства «Машиностроение».

За длительную историю своего существования орудия труда, являясь средством расширения физических возможностей человека в процессе производства продуктов труда, претерпели значительные изменения и усовершенствования. Их роль в жизнедеятельности человеческого общества характеризуется сначала исполнением примитивных функций в процессе труда, затем постепенным расширением этих функций и, наконец, заменой не только физических усилий человека, но и некоторых, хотя и элементарных, функций логического мышления.

Непрерывное расширение и усложнение выполняемых орудиями труда функций в системе человек—машина подтверждает диалектическую трактовку их развития. Общеизвестно, что этот процесс происходил неравномерно во времени [1]. Если первые приспособления, предназначенные для расширения физических возможностей человека при выполнении той или иной работы, были элементарными орудиями в виде палок, камней, топоров, ножей и т. п., то на современном этапе развития человеческого общества мы имеем дело с целыми системами, которые не только заменяют физический труд, но и поддаются автоматическому управлению, а также осуществляют свой рабочий процесс при оптимальных параметрах и режимах. Это стало возможным потому, что орудия труда к настоящему времени прошли длительный и сложный путь усовершенствования: от приспособлений — к механизмам, от механизмов — к машинам с ручным приводом и с приводом от отдельных двигателей. Наконец, появились автоматические системы машин, а в наши дни в технике выделяется наиболее совершенная совокупность орудий труда, иногда называемая большими техническими системами [5, 27, 51].

Развитие орудий труда происходило не изолированно от воздействия различных внешних факторов. На этот процесс оказывали влияние не только достижения науки, техники, экономики, но и социальные аспекты развития человеческого общества.

Таким образом, процессы усовершенствования орудий труда и развития человеческого общества в целом взаимосвязаны. Это значит, что объективные законы должны проявляться и в самом развитии орудий труда. Важно лишь суметь отыскать результаты воздействия этих законов, определить их сущность и научиться ими пользоваться.

Рассмотрим еще один аспект развития орудий труда. Все, что создано человеком для повышения производительности и улучшения

условий его жизнедеятельности, во времени усложняется. Усложнение конструкций машин в свою очередь требует увеличения затрат труда, времени и средств на их создание и эксплуатацию. При разработке и использовании орудий труда человечество вынуждено затрачивать все больше усилий на поиски закономерностей, определяющих процесс их развития, т. е. на привлечение научно обоснованных методов решения задач, возникающих при их создании и совершенствовании.

В настоящее время создание технических систем сопряжено с немалыми затратами — финансовыми, трудовыми и временными. К тому же само планирование развития качественных показателей орудий труда, а также решение других задач промышленного производства требуют длительного времени. Это значит, что ошибки, заложенные сегодня, проявятся значительно позднее, когда в процессе создания орудий труда будет вложен большой труд и исправление ошибок будет связано с большими потерями времени. Около 15 лет назад сформировалась новая наука — общая теория систем. Ее появление обусловлено необходимостью управления сложными процессами взаимодействия многих одновременно функционирующих орудий труда. Особенно важно эффективно управлять быстродействующими системами, поскольку их возможные аварии сопряжены с большими, иногда катастрофическими последствиями.

В последние десятилетия в науке происходит двоякий процесс. С одной стороны, наблюдается тенденция слияния нескольких отдельных наук в сложные комплексы. Так возникли, например, радиотехника, медицинская кибернетика, физическая и коллоидная химия, химическая физика и т. п. С другой стороны, идет процесс дифференциации наук: в рамках одной науки появляются самостоятельные узконаправленные разделы, включающие лишь конкретные области знаний. Так, например, на стыке наук возникла новая наука — бионика, исследующая аналогии между живыми и искусственными системами. Подобные же причины обусловили появление теории связи, теоретической радиоэлектроники. В целом эти тенденции порождены тесной связью науки с техникой непосредственно, а следовательно, и с промышленным производством.

Реализуется предсказанный В. И. Лениным процесс слияния философских и естественных наук. Ленинское утверждение о том, что в „диалектической обработке” нуждаются и знания о нашей повседневной действительности [33], актуально и для познания законов развития искусственных систем, созданных человеком в виде орудий труда.

По мнению некоторых исследователей, в будущем ожидается формирование новой технической науки — общей теории техники, в задачи которой будет входить изучение общих направлений развития технических систем с целью познания этого процесса и создания эффективных технических устройств рациональным путем [49].

Таким образом, процесс слияния и дифференциации наук углубляет и расширяет знания об окружающем нас мире, позволяя более эффективно создавать искусственные системы в виде орудий труда. «Диалектическая обработка» наших знаний в области естественных, и в частности, технических наук открывает важное направление, связанное с распознаванием объективно существующих закономерностей развития разрабатываемых человеком искусственных систем. Такие закономерности еще только выявляются, а обобщенные выводы, которыми можно было бы руководствоваться при создании и использовании технических систем, пока отсутствуют. Однако ученые и специалисты все ближе подходят к решению этой проблемы. Как уже было отмечено, из-за отсутствия выявленных объективных закономерностей развития технических систем, как, впрочем, и систем вообще, решение этих вопросов базируется на эмпирических, а зачастую и эвристических началах. Между тем, основываясь на знании объективных законов, можно было бы научно обоснованно решать задачи планирования и развития народного хозяйства не только на короткие, но и на длительные периоды, без неточностей и ошибок, которые имеют место в настоящее время.

Исследование тенденций изменения параметров технических систем, особенно таких, которые реализуют непрерывные технологические процессы и развиваются, как правило, динамично, показывает, что в настоящее время созданы весомые предпосылки для разработки в рамках научного направления — общей теории систем — нового ответвления, целью которого будет выявление, анализ и описание закономерностей развития технических параметров, конструкций и других характеристик современных орудий труда.

Наши исследования уникального по функциональным, морфологическим и другим характеристикам целлюлозно-бумажного оборудования, основные виды которого представляют собой сложные технические системы, уже позволили выявить такие закономерности [48]. Чтобы их обнаружить, потребовался глубокий ретроспективный статистический анализ причин и следствий, обусловивших те или иные изменения параметров и конструкций этих орудий труда. Исследования аналогичных технических систем в других отраслях народного хозяйства показали полную адекватность тенденций их развития закономерностям, выявленным для целлюлозно-бумажного оборудования¹.

Выявленные закономерности получили аналитическое описание и прошли апробацию, которая подтвердила возможность их при-

¹ Анализ процессов развития систем, не относящихся к технике, показал, что они также имеют аналогичные закономерности, о чем будет сказано ниже. Результаты исследований приводят к мысли о возможности применения полученных закономерностей к другим видам систем, не только искусственным, но и естественным и абстрактным, что, разумеется, потребует дополнительных исследований.

менения в качестве моделей процесса развития систем, хорошо совпадающих с фактическими результатами.

Таким образом, опираясь на законы развития систем, мы получили возможность составлять модели, обладающие высокой адекватностью реальным системам. Это значит, что прогнозирование развития реальных систем может выполняться на базе научно обоснованных методов, которые позволят вести процессы планирования народного хозяйства, прогнозирования различных аспектов развития общества с глубоким обоснованием и большой точностью.

Кроме того, познание общих законов развития систем расширяет наши научные представления и способствует развитию и совершенствованию такого направления науки, как общая теория систем.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОРУДИЙ ТРУДА

Поскольку мы рассматриваем технические системы как явление материального мира, нас прежде всего интересует качественная сторона процесса существования этих созданных человеком орудий труда. Естественно, мы подразумеваем технические системы как вид, т.е. суммированную во времени совокупность отдельных систем, поскольку только виду присущи общие закономерности роста, объективные законы развития. Однако и отдельные представители технических систем внутри одного вида интересуют нас не меньше, поскольку каждая из них несет в себе показатели, свойственные виду в целом, а также отражает сложные взаимоотношения с многофакторными воздействиями внешней среды, отличающиеся большой неопределенностью. Если не выявлен характер взаимоотношений с внешней средой каждого конкретного представителя рассматриваемого вида, бесполезно искать закономерности развития самого вида.

Развитие любого вида включает процессы эволюционные, характеризующие количественные изменения, и революционные, отражающие качественные изменения. Ретроспективный анализ развития орудий труда необходимо проводить именно с этих позиций. Общеизвестно, что развитие современного общества базируется прежде всего на достижениях науки и техники. Известно также, что активное вторжение научных знаний в деятельность человека началось со времен зарождения организованной науки. Этот процесс обусловил непрерывное усложнение орудий труда по мере их совершенствования и замены все более разнообразных функций человека с небывало высокой для его физических возможностей производительностью. Орудия труда быстро изменяются, их конструкции совершенствуются, они становятся все более производительными. Поскольку все процессы, которые реализуются с помощью этих орудий, протескают, как правило, динамично, это приводит к адекватному усложнению взаимоотношений человека с создаваемыми им орудиями труда.

1.1. Изменение функций орудий труда в процессе развития

Первыми орудиями, которые человек применял для облегчения своего труда, были простейшие приспособления — палки, камни, топоры, ножи, колья и др. Несмотря на примитивность как самих

приспособлений, так и выполняемых ими функций, во взаимоотношениях человека с ними по существу уже была заложена программа их развития, которая привела к созданию современных автоматизированных систем, заменивших не только физический труд, но и способных вести осуществляемый процесс на оптимальных технологических режимах. Эти взаимоотношения строились и строятся поныне на стремлении человека переложить ограниченные по физической силе и быстрдействию возможности своего организма на созданные им орудия.

Вторым этапом развития орудий труда считают изобретение человеком механизмов. Механизмы обладали значительно более широкими функциями, поскольку они были способны выполнять уже отдельные операции созидательного процесса. Правда, они не имели способности производить готовый продукт в пределах всего технологического цикла, однако новым по сравнению с первым этапом было то, что с их помощью стало возможно трансформировать физические усилия человека. Примером простейших механизмов могут служить рычаги первого и второго рода, а также их совокупности, имеющие определенное целевое назначение.

Однако и приспособления, и механизмы являются, по определению К. Маркса, «орудиями человеческого организма» [1, с. 389]. На их базе люди создали качественно новый вид орудий труда — машины. Это третий, машинный этап развития орудий труда, когда, по определению К. Маркса, используются «орудия механического аппарата» [1, с. 389].

Машины как вид орудий труда являются чрезвычайно важным фактором в истории развития системы человек—орудия труда. Их качественные показатели обусловили бурный рост производительности труда и эффективность функционирования этой системы в целом.

Дальнейшее усовершенствование конструкций машин, расширение и усложнение их функций позволили комбинировать из них системы, способные перерабатывать сырье по полному циклу вплоть до получения готового продукта. Создание систем машин еще более повысило производительность труда, интенсифицировало сам процесс производства продукции. На этом этапе развития орудий труда особенно усложняются функции людей, управляющих такими системами.

Появление первых устройств, позволяющих автоматически поддерживать заданные параметры отдельных операций, осуществляемых машинами, видоизменило управляющие функции человека. Это в свою очередь стало основой для завершения формирования новой совокупности орудий труда — автоматических систем машин. К. Маркс так характеризует эту совокупность орудий труда: «Когда рабочая машина выполняет все движения, необходимые для обработки сырого материала, без содействия человека и нуждается лишь в контроле со стороны рабочего, мы имеем перед собой автоматическую систему машин, которая, однако, способна к постоянному усовершенствованию в деталях...» [1, с. 392].

Такие системы машин способны производить готовый продукт, осуществляя весь технологический цикл от сырья до получения готового продукта. Ныне они функционируют самостоятельно, управляясь автоматически в заданном режиме или с помощью современных автоматических систем управления технологическим процессом.

Прослеженный путь развития орудий труда позволяет выявить следующие принципиальные этапы эволюции взаимоотношений человека и созданных им систем:

- замена механических функций (мускульных усилий);
- замена функций управления (сначала простейших технологических операций, затем целых процессов управления);
- постепенное неравномерное усложнение и рост уровня взаимоотношений человека и орудий труда по мере совершенствования их конструкций и повышения научно-технических и экономических возможностей общества.

Заметим, что некоторые авторы отходят от общепринятой трактовки процессов развития орудий труда: это неизбежно приводит к искаженному пониманию сути взаимоотношений человека с ними. В работе [12], например, эти взаимоотношения отождествляются с заменой человека машинами. Авторы утверждают (с. 19): «Для исторического процесса развития орудий и машин характерна тенденция замены человека-исполнителя машинами. В развитии этой тенденции отчетливо выступают отдельные качественные периоды:

1. Весь комплекс многообразных составляющих физической и интеллектуальной деятельности человека в производстве материальных благ выполняется самим человеком, использующим разнообразное орудие труда.

2. Человек заменяется транспортными машинами, приводимыми в движение живым двигателем (прирученные животные).

3. Человек в выполнении функций двигателя заменяется энергетическими машинами.

4. Человек заменяется машиной, выполняющей технологические функции, требующие от исполнителя навыков, умения, квалификации (замена рук рабочего машиной и передача машине орудия).

5. Человек заменяется автоматизированными системами машин, выполняющими функции контроля и управления производственным процессом и поддержания этого процесса в заданном режиме.

6. Человек заменяется вычислительными машинами и кибернетическими устройствами, которые выполняют ряд логических операций».

Здесь по существу речь идет лишь о замене отдельных функций человека машинами. Поэтому нелогичным воспринимается правильный вывод авторов о том, что самая совершенная машина никогда не заменит человека-творца.

Для того чтобы рационально управлять процессами создания и использования в народном хозяйстве орудий труда на современном этапе их развития, необходимо найти объективные закономерности, присущие этому развитию, и познать взаимную обусловленность причин и следствий, приводящих к изменению параметров и конструкций орудий труда.

Как уже говорилось, этапы совершенствования орудий труда от приспособлений до автоматических систем машин характеризуются двумя аспектами, связанными с заменой механических и управленческих функций человека. Переключивание человеком этих функций на машины происходило последовательно. Сначала орудия труда заменили мускульные усилия, механизировав процесс труда. На этом этапе все функции управления осуществлялись только человеком. Значительно большие возможности для интенсификации процесса производства у машин обусловили необходимость создания таких же искусственных средств для замены управленческих функций человека, поскольку его быстрое действие в этой области также ограничено. Этим определялась актуальность автоматизации отдельных операций управления, осуществлявшихся человеком.

Изобретение первых регуляторов прямого действия, усовершенствование их конструкций, а также создание новых, более совершенных приборов управления позволили перейти к использованию орудий труда на более высокой ступени замены функций человека. Так, дополнительно к замене мускульных усилий появилась возможность переложить на орудия труда некоторые, на первых порах примитивные функции управления.

Проанализируем этот аспект развития орудий труда на примере создания и использования бумагоделательных машин, являющихся основным видом оборудования для получения бумаги в процессе целлюлозно-бумажного производства.

Бумагоделательные машины реализуют непрерывные технологические процессы, т.е. наряду с последовательным осуществлением различных технологических операций переработки полуфабриката здесь реализуется принцип его непрерывной транспортировки. Бумагоделательные машины обладают и другим замечательным свойством: их рабочие органы не имеют потерь времени на холостые движения. В технике известно мало примеров подобного сочетания этих важнейших качеств орудий труда (турбины, электрические машины). Такое удачное сочетание привело к тому, что за короткий период своего существования (около двух веков) бумагоделательные машины претерпели динамичный путь развития.

Исследование причин и следствий изменения конструкций и параметров бумагоделательных машин в ретроспективном плане позволило выявить объективные закономерности развития этих уникальных систем, которые, как будет показано далее, по праву можно причислить к современным автоматическим системам машин, или техническим системам. Чтобы подойти к изучению зако-

номерностей развития бумагоделательных машин как средств производства, проследим эволюцию передачи им функций человека.

Способ производства бумаги из водоволокнистых суспензий с использованием волокон растительного происхождения насчитывает более семнадцати столетий. Орудия же труда, реализующие процесс непрерывного производства бумаги, были изобретены только в начале прошлого века. Поэтому реализация этого способа начиналась с использования простейших приспособлений. Так, для измельчения коры тутового дерева (в начале II в. н. э.), шелковицы и других растительных материалов, использовавшихся в качестве сырья, применяли различного рода толчеи, ступы, емкости с сетками для отлива бумажного полотна и т. д. Все эти приспособления требовали приложения физических сил и никак не трансформировали мускульные усилия человека, которые затрачивались при операциях подготовки суспензии и отлива полотна бумаги. Этот способ производства на протяжении многих веков развивался, базируясь исключительно на эмпирических представлениях о сущности технологического процесса. Лишь вторая половина XX в. ознаменовалась фундаментальными исследованиями процессов термомеханической и термохимической обработки растительных волокон, их связеобразования в готовом полотне бумаги и картона и т. п. Глубокому изучению подверглись также гидродинамические процессы транспортировки и диспергирования волокон в технологической среде, которой в данном случае служит вода. Тем не менее, не зная сущности процесса, человечество достигло больших успехов в реализации водоволокнистого способа производства бумаги и картона. Достаточно сказать, что уже в середине XX в. единичные мощности технологических потоков стали настолько большими, что они свободно конкурировали с другими непрерывными процессами (например, в химической промышленности). Это свидетельствует о совершенстве самой идеи производства бумаги из водоволокнистой суспензии, реализованной еще в конце I в. н. э.

Рассмотрим кратко ход развития техники производства бумаги и проследим эволюцию изменения функций применявшихся при этом орудий труда.

Анализ истории развития производства бумаги — увлекательный процесс познания одного из самых совершенных изобретений человечества. Секрет этого производства заключается в том, что стебли растений, подвергнутые термохимической обработке с последующим измельчением и растиранием, после замачивания в воде образуют суспензию с хорошо диспергированными растительными волокнами. При отливе на сетку и обезвоживании из такой суспензии формируется материал с достаточно прочными связями между отдельными волокнами. Изобретение используемого и в настоящее время способа производства бумаги приписывают Цзай-Луню (Китай, конец I — начало II в. н. э.).



Рис. 1. Ручной способ производства бумаги в период мануфактур

В период ремесленного производства бумаги сырьем для нее служил бамбук, стебли которого мелко нарезали, толкли в ступах, а затем подвергали варке и замачиванию в щелочном растворе. Полученную массу разбавляли водой до жидкотекучего состояния. Суспензию зачерпывали ящиком с сетчатым дном. Вода стекала через сетку, а на поверхности сетки образовывался волокнистый слой, который затем снимали и высушивали на воздухе или на специальных печах. В период ремесленного производства этот процесс получил четкое разделение на отдельные последовательно совершавшиеся технологические операции, большинство которых в дальнейшем было механизировано.

По мере многовекового развития технологический процесс производства бумаги в различных странах видоизменялся: появились более совершенные инструменты, упростились и стали более производительными приемы, расширилась сырьевая база, на смену бамбуку пришел камыш, затем хлопок, еще позднее — древесное волокно. Все это открыло возможности создавать совокупности специализированных производств в виде мануфактур (рис. 1).

В средние века на крупных мануфактурах Азии и Европы начинался механизация операций: совершенствуется измельчение волокон в ступах, внедряются специальные механизмы — роллы для размола волокнистой суспензии, водяные прижимы для прессования бумаги и т. д.

Третий этап развития орудий труда, как уже отмечалось, связан с созданием машин, которые явились основой организации промышленного производства.

Мануфактурное производство бумаги с использованием приспособлений и механизмов просуществовало до начала XIX в., когда Луи Робером во Франции был заявлен патент на первую бумагоделательную машину (рис. 2). Хронологически и функционально машина Л. Робера является ярким примером, иллюстрирующим третий этап развития орудий труда. В этот период идет бурное развитие науки, которую начинают использовать в производственных целях. В отдельные науки выделяются физика, химия, математика и ряд других. Систематизируются знания об окружающей человека действительности, открываются законы, исследуется и объясняется природа процессов и явлений. Однако на данном этапе развития орудий труда наука лишь следует за производством, получая интенсивное развитие при возникновении конкретных потребностей производства [38].

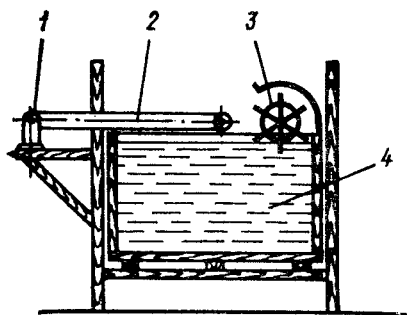


Рис. 2. Схема бумагоделательной машины Луи Робера

1 — приводной вал сетки; 2 — бесконечная сетка для отлива бумаги; 3 — черпальное колесо; 4 — бассейн с суспензией

Дальнейший путь развития машинного производства бумаги наглядно показывает революционные преобразования как в росте производительности труда и организации производства, так и в использовании научных достижений. Бумагоделательная машина, изобретенная Луи Робером в 1800 г., механизировала операции черпания суспензии, налива суспензии на сетку, непрерывного транспортирования волокнистого слоя, обезвоживания и формования листа. Таким образом, в первой конструкции бумагоделательной машины были механизированы два процесса: подачи водоволокнистой суспензии на сетку с непрерывным отливом и транспортирования бумажного полотна. С этого времени начался бурный процесс усовершенствования как самого технологического процесса производства бумаги, так и орудий труда, применявшихся при его осуществлении.

В 1805 г. была изобретена круглосеточная машина для производства бумаги, в 1811 г. впервые применен плоскоремешный привод. В 1825 г. в России на машинах Петергофской бумажной фабрики были установлены сушильные цилиндры с подогревом пара [56]. В 1843 г. Г. Келлер в Германии изобрел древесную массу, а в 1852 г. был запатентован шахтный дефибрер для ее производства. В 1860 г. в г. Рейсфорд штата Пенсильвания (США) был пущен первый завод по производству натронной целлюлозы щелочным способом, открытым Б. Ц. Тильгманом. Свойство древесины размягчаться в серной кислоте или в растворах ее солей при повышенных температуре и давлении было использовано в 1874 г. Ц. Экманом, который построил в Бервиле (Англия) первый сульфитно-целлюлозный завод. Сульфитная целлюлоза хорошо отбеливается, поэтому бумажное производство получило новый ценный полуфабрикат. В 1879 г. был применен для варки вместо щелочи более дешевый полуфабрикат — сульфит натрия, тем самым положено начало производству сульфатной целлюлозы, которая к настоящему времени является преобладающим видом в общем объеме производимой целлюлозы.

Бумагоделательная машина Л. Робера представляла собой совокупность отдельных механизмов и сначала приводилась вручную. На первых порах она, подобно ткацкому станку, использовалась человеком в качестве орудия, механизировавшего труд. Когда рабочие органы бумагоделательной машины стали приводиться в движение без помощи человека, она продолжала выполнять те же функции, но уже с большей скоростью. Машина стала устройством, у которого все части, в том числе рабочие органы, работали согласованно и преобразовывали подводимую извне энергию с одновременным изменением полуфабриката (волокнистой суспензии) от жидкого состояния до твердого упругого тела — полотна бумаги, сформованного на бесконечной сетке.

Величайший вклад Л. Робера в механизацию процесса производства бумаги состоит в том, что он изобрел главную часть бумагоделательной машины непрерывного действия — сеточную. В дальнейшем остальные участки машины, предназначенные для

механизации процессов прессования, сушки и отбелики полотна, были подчинены процессу отлива, соответственно усовершенствовались и развивались, обеспечивая непрерывность производства. В конечном результате это позволило создать за короткий срок непрерывную поточную линию, дальнейшее развитие которой идет главным образом по пути интенсификации реализуемых процессов.

Уровень развития машиностроения в начале XIX в. позволял механизировать также дискретный способ отлива бумаги, что по существу и было сделано позднее. Однако дискретный способ заведомо ограничивал производственные возможности, и бумагоделательные машины не смогли бы достигнуть той производительности, которую они имеют при непрерывном способе производства.

Бумагоделательная машина по мере своего развития принимала на себя все более сложные функции человека. Так, машина Робера, помимо чисто технологических операций, уже была способна непрерывно транспортировать полуфабрикат. Эта особенность, определившая путь развития бумагоделательных машин, остается неизменной и в современных конструкциях. Кроме того, как уже отмечалось, в машине Робера было заложено и другое принципиально важное свойство: ее рабочие органы не имели потерь рабочего времени на холостые движения, что является большим достижением не только для машин того времени, но и для современной техники, во многом определяющим ее эффективность.

Наконец, следует отметить еще одну важную особенность машины Робера: она имела совершенную конструкцию рабочих органов в виде двухопорных тел вращения.

Эти три фундаментальных свойства по мере усовершенствования бумагоделательной машины определили динамику расширения ее функций.

Резюмируем эволюцию функций бумагоделательных машин. На первых порах они выполняли не все технологические операции и имели ручной привод. Только когда в их структуре появился самостоятельный привод, т.е. когда они стали, по выражению К. Маркса, «двигательной машиной» [1, с. 389], они полностью заменили мускульную силу человека. Таким образом, машина приняла на себя функции орудия труда с полной механизацией процесса производства. С этого времени открывается новый этап в развитии бумагоделательной машины, который можно характеризовать словами К. Маркса «...двигательная машина приобретает самостоятельную форму, совершенно свободную от тех ограничений, которые свойственны человеческой силе» [1, с. 389].

Механизация производства открыла возможность увеличения производительности бумагоделательной машины. Однако через некоторое время она стала сдерживаться ограниченным быстродействием человека при выполнении операций управления. Появление автоматических средств регулирования обусловило возможность

передачи бумагоделательным машинам функций управления отдельными технологическими операциями.

В дальнейшем управление подавляющим большинством технологических операций перешло к автоматическим устройствам. Таким образом, наиболее простые управленческие функции человека стали заменяться автоматами. Однако полностью заменить их оказалось невозможным не только в начальный период развития средств автоматизации, но и до наших дней, поскольку, превратившись в автоматическую систему, бумагоделательная машина все же представляет собой образец решения задач управления экстенсивным путем.

По существу способ решения задач автоматического управления на протяжении всей истории развития бумагоделательной машины с качественных позиций был неизменным. Разница заключалась лишь в количестве автоматизированных операций и в техническом уровне автоматов. Принцип же заключался в автоматическом поддержании технологических параметров операций в заданных человеческом пределах. Качественная оценка этих параметров, их сопоставление и принятие решений по их корректировке до настоящего времени остаются за оператором.

Автоматизация отдельных операций техническими средствами открыла возможности резкой интенсификации этих операций. Однако быстрое действие человека в качественной оценке параметров многочисленных технологических операций, сопоставлении их и принятии решений по рациональному соотношению их количественных показателей остается невысоким. Это значительно сдерживает дальнейший рост производительности бумагоделательной машины. Таким образом, ограниченность быстрого действия оператора в принятии управленческих решений стала фактором, сдерживающим прогресс производительности.

В наши дни потребовался принципиально новый способ управления машиной. Он заключается в выборе оптимального соотношения технических параметров различных операций с быстрым действием, значительно превосходящим возможности человека. Средством для решения таких логических задач явились автоматические системы управления технологическими процессами (АСУТП), промышленное применение которых открывает очередной этап интенсификации производительности бумагоделательных машин. Хотя технический уровень АСУТП еще далек от совершенства и область их применения пока ограничена, результаты решения управленческих задач с их помощью позволяют надеяться на возможность дальнейшей интенсификации процесса производства бумаги на современных машинах.

Итак, эволюция функций бумагоделательных машин в системе человек—орудие труда прошла следующие три этапа: 1) замена мускульной силы, т. е. механизация производственных процессов; 2) автоматизация отдельных операций управления; 3) оптимизация соотношений показателей технологических процессов и управление с помощью средств АСУТП.

1.2. Появление технических систем

Весь путь развития орудий труда в ретроспективном историческом аспекте можно представить как поэтапное усовершенствование и расширение их функций, хронологически совпадающее с эволюционными преобразованиями человеческого общества.

Первый период характеризуется неорганизованным накоплением опыта путем использования человеком в своей деятельности различных естественных предметов, которые он в дальнейшем подвергал примитивной обработке. Это этап приспособлений в развитии орудий труда. Он предшествовал возникновению ремесленного производства и совпал с предысторией научной эры.

Когда человек научился создавать первые механизмы, настал второй период, или эра организованного производства, которая тесно связана с синтезом орудий труда, развитием науки и организацией общественного производства, совпадая со вторым этапом развития орудий труда — этапом создания механизмов. Замечательно, что она соответствовала периоду ремесленного способа производства, а точнее, явилась основой его организации. В это время формируется и наука, которая переходит от стадии размышлений и наблюдений к организованным научным экспериментам, восходящим к опытам Галилея, когда он с помощью наклонной плоскости изучал замедление свободного падения тела [38].

Совокупности механизмов, применявшиеся в ремесленном производстве, по мере усовершенствования становятся технической базой для перехода к организации мануфактурного производства.

Изобретение машин положило начало третьему этапу развития орудий труда. Промышленная революция позволила на значительно более высоком уровне решать вопросы создания средств производства и промышленного выпуска продукции, стимулируя научные разработки, результаты которых активно использовались промышленностью.

На примере развития бумажного производства наглядно видны все этапы преобразования орудий труда от элементарных приспособлений до машин. Ниже будет показано, как происходило развитие бумагоделательных машин, когда они механизировали труд человека, а затем в их конструкциях стали применяться результаты достижений в области автоматизации и регулирования отдельных технологических операций.

Когда возникла возможность автоматического управления отдельными технологическими операциями, в структуре бумагоделательных машин появилась новая составная часть, предназначенная для процессов управления. Автоматизация обусловила бурный рост производительности машин и динамичное изменение их конструкций, которые целенаправленно совершенствовались для реализации резкой интенсификации производственных процессов. Современные системы автоматизированного управления бумагоделательными машинами уже позволяют освободить операторов

от выполнения достаточно большого количества логических действий в области управления.

Системы машин и техника вообще, являясь мощным стимулом развития производительных сил общества, в то же время, как известно, представляют собой наиболее подвижный их элемент. Существенные преобразования конструкций машин, на которые были возложены уже и некоторые управленческие функции человека, приводили как к резкому усложнению самих конструкций, так и к увеличению размеров отдельных машин и их систем, целенаправленно сочетаемых для реализации процесса переработки полуфабриката в готовый продукт по полному технологическому циклу.

Появление современных технических систем по существу было предсказано К. Марксом, когда он дал определение автоматической системы машин. Это было на этапе внедрения средств автоматизации только для регулирования отдельных технологических операций и поддержания их в заданном режиме. Когда же в структуру автоматических систем машин вошла сформировавшаяся кибернетическая часть, они превратились в современные, значительно более сложные технические системы, которые используются в настоящее время практически во всех отраслях промышленности.

Если проанализировать динамику развития общественных экономических формаций и орудий труда (табл. 1.1), можно увидеть на этом фоне появление технических систем. В таблице наглядно прослеживается сокращение хронологических периодов существования различных форм орудий труда и рост их эффективности. Если темпы развития первобытно-общинного строя даже в завершающей фазе измерялись десятками тысяч лет, то темпы развития рабовладельческого — уже тысячелетиями. Феодализм еще усилил темпы, они измеряются десятками веков; капитализм сформировался за период примерно около трех столетий. Характерные качественные сдвиги эпохи отмирания капитализма и становления первой фазы коммунистической формации измеряются десятилетиями.

Эта закономерность адекватна закономерности изменения функций орудий труда, а также форм организации производства по мере развития человеческого общества. Растущая роль орудий труда в процессах производства, их качественный функциональный рост создают такие условия, когда при сбалансированности всех видов деятельности общества в производстве продуктов труда назревает возможность взрывообразного роста производительности труда. Это свидетельствует о революционной ситуации или о глобальности воздействия научно-технической революции на развитие производительных сил и производственных отношений. В организмическом единстве производительных сил и производственных отношений как основе общественно-экономической формации коммунизма необходимо искать результаты воздействия научно-технической революции на развитие человеческого общества.

XX век является частью переходного периода от капитализма к коммунизму, т. е. периодом социалистической революции, когда

Т а б л и ц а 1.1. Динамика развития общественных формаций и орудий труда

Общественная формация	Период становления	Высший уровень орудий труда	Способ производства	Форма организации производства
Первобытно-общинный строй	Примерно до I тысячелетия н. э.	Приспособления	Первобытно-общинный (индивидуально-общинного склада без эксплуатации человека человеком)	Индивидуально-общинная без разделения труда
Рабовладельческий строй	I в. до н. э.—V в. н. э.	Механизмы	Рабовладельческий (с принудительным трудом)	Ремесла (с разделением труда)
Феодальный строй	V—XV вв.	Механизмы	Феодальный (с принудительным трудом)	Мануфактуры (с разделением труда)
Капитализм	XVI—XVIII вв.	Машины, автоматические системы машин, технические системы	Капиталистический (с эксплуатацией человека человеком)	Промышленное машинное производство, автоматизированное производство
Социализм (первая фаза коммунизма)	XX в.	Автоматические системы машин, технические системы	Социалистический (с осознанной потребностью труда)	Промышленное машинное и автоматизированное производство, предприятия-автоматы будущего

происходит замена одного способа производства другим. Это подтверждается всем ходом социально-экономических преобразований, охвативших в настоящее время по существу весь земной шар. Высокоэффективные орудия труда становятся все более доступными для отсталых народов и регионов. Глобальность этого процесса определяет экономическую мощь в будущем тех стран, которые обладают необходимыми природными ресурсами.

Экономика нашей страны переходит на интенсивный путь развития благодаря комплексной автоматизации промышленного производства. Робототехнические комплексы, гибкие производственные системы, другие виды автоматизированных систем промышленных и непромышленных отраслей народного хозяйства представляют собой высший уровень развития орудий труда и базу современного общественного производства.

Итак, мы проследили, каким образом изменение функций орудий труда привело к формированию современной ступени их совершенствования — техническим системам. До настоящего времени отсутствует четкое определение технических систем¹. Однако они существуют как объективное единство с целевым назначением, со своей структурой и функциональными связями между составными частями. Они имеют также кибернетическую часть, которая предназначена для реализации заданного технологического процесса автоматически и наиболее рационально.

Мы будем понимать под технической системой объективное единство машин, предназначенных для осуществления всего технологического цикла производства готового продукта, способное к усовершенствованию и самостоятельному функционированию благодаря наличию кибернетической части. Таким образом, предмет наших исследований представляет собой совокупность орудий труда, функционирующих на всем протяжении истории своего развития. Мы не отождествляем их с так называемыми большими системами (например, с энергетической системой страны), которым свойствен принцип необозримости информации об их функционировании, или так называемое «проклятие размерности». Вместе с тем степень сложности современных технических систем не является отличительным признаком по отношению к тем совокупностям орудий труда, которые существовали ранее и уже тогда имели в своей структуре все составные части (двигательную, передающую энергию, исполнительную и кибернетическую), обусловившие их принадлежность к техническим системам независимо от простоты или сложности конструкций. Поэтому, не считая некорректным определение «большая техническая система» [50, 51], мы остановимся на более обобщенном термине — «техническая система», поскольку признаки величины и сложности в данном случае не являются определяющими.

Технические системы, сформировавшиеся к настоящему времени в объективное единство машин целенаправленного действия,

¹ Иногда их называют большими [50, 51].

нельзя воспринимать как нечто обособленное и функционирующее вне закономерностей, которые присущи процессу развития всех орудий труда. Рассматривая эту наиболее высокую ступень развития орудий труда в историческом аспекте, мы можем выявить закономерности, которые привели к появлению их как таковых. Установив такие закономерности, можно составить модели для описания процессов их развития не только в прошлом, но и в будущем.

1.3. Иерархическая структура орудий труда в народном хозяйстве

Организация любого промышленного производства требует наличия определенных ресурсов, средств производства и системы управления.

К категории ресурсов относятся различные виды энергии, людские ресурсы; средства производства включают в себя орудия труда и орудия-двигатели. Кроме того, надо владеть определенными приемами целенаправленного использования ресурсов и средств производства, т. е. технологией производства. Наконец, чтобы заставить целенаправленно функционировать все компоненты промышленного производства, надо иметь разработанную систему управления и людей, умеющих ее осуществлять.

Производительные силы общества в современный период промышленного производства характеризуются чрезвычайно разветвленными и многообразными взаимоотношениями человека с орудиями труда, разобраться в которых без системного анализа не просто. Для правильной ориентации во всем многообразии орудий труда, их месте и роли в организации промышленного производства целесообразно провести систематизацию самого производства. Чтобы раскрыть его научно-техническую сторону, рассмотрим иерархическую схему, которая включает технологический процесс, машины и готовый продукт.

Технологический процесс определяет систему целенаправленных действий в процессе производства в период между двумя противоположными по своей готовности объектами: сырьем и конечной продукцией. Действия эти осуществляются совокупностью машин, управляемых человеком, и в этом смысле машины являются средством реализации технологического процесса. Работа машин и действия людей могут быть более или менее рациональными и самыми разнообразными. Однако их конечная цель достигается получением готовой продукции. Анализируя технологию как систему целенаправленных действий, которая делится на виды, классы, типы и методы, можно выявить определенную иерархическую последовательность ее структуры.

Вид технологии определяет решение технологической задачи по принципу движения (перемещения) и обработки сырья и продуктов в процессе производства. Существуют два вида техноло-

гии — непрерывный и дискретный. Они образуют четыре комбинации:

Комбинация	Принцип движения	Принцип обработки
1	Непрерывный	Непрерывный
2	»	Дискретный
3	Дискретный	Непрерывный
4	»	Дискретный

Наиболее совершенным является процесс, осуществляемый по принципу непрерывности обработки полуфабриката и непрерывности его перемещения по технологическим операциям. В этом случае имеются наилучшие предпосылки для интенсификации производства.

Класс технологии определяет выбор технологического решения задачи по видам сырья или полуфабрикатов. Так, один и тот же продукт может быть получен из различных исходных материалов (например, сахар из тростника и сахар из свеклы).

Тип технологии определяет подготовку сырья или полуфабрикатов с использованием технологической среды. В зависимости от технологической среды из одного и того же древесного сырья можно получать сульфитную, сульфатную целлюлозу, а также осуществлять ее варку в кислородно-щелочной среде и т. п.

Наконец, *метод технологии* определяет существо технологических процессов превращения сырья в готовый продукт с учетом вида, класса и типа технологии. Так, в зависимости от используемого оборудования бумагу можно получать осаждением на сетку или напылением; можно наносить информацию на бумагу краской, химическими, электрографическими и другими методами и т. п.

Промышленная реализация технологии включает конструктивное оформление орудий труда в виде машин или системы машин как средства для выполнения заданного метода технологического процесса.

Рассмотрим изложенную систематизацию применительно к производству бумаги. История развития производства бумаги как продукта включает ориентацию на оба вида технологии (табл. 1.2) — дискретный (Д) и непрерывный (Н). Дискретный технологический процесс, как более ранний, явился основой промышленного производства бумаги в начальный период. Затем на базе дискретного сформировался непрерывный технологический процесс, получивший бурное развитие и применяемый в подавляющем большинстве случаев в настоящее время. Эти два вида можно разделить на классы. Непрерывный вид включает два класса производства бумаги — из волокна (НВ) и из пластических масс (НП). Дискретный же вид технологического процесса включает только один класс — из волокон (ДВ). Он оказался неперспективным и не получил развития из-за низкой производительности. Каждый из этих классов делится на типы. Класс НВ включает типы технологического процесса: из водных суспензий

Таблица 1.2. Обозначения технологических процессов производства бумаги

Структура технологии	Обозначение	Расшифровка
Вид	Н	Непрерывный
Класс	Д	Дискретный
	НВ	Непрерывный из волокна
	НП	Непрерывный из пластмасс
Тип	ДВ	Дискретный из волокна
	НВГ	Непрерывный из волокна в водных суспензиях
	НВВ	То же в воздушных суспензиях
	НВК	То же в ковриках
	НПП	Непрерывный из пластмасс в гранулах или порошках
	ДВГ	Дискретный из волокна в водных суспензиях, осаждением
	НВГН	То же напылением
	НВВО	Непрерывный из волокна в воздушных суспензиях, осаждением
	НВВН	То же напылением
	НВКР	Непрерывный из волокна в ковриках, расчесыванием
	НППЭ	Непрерывный из пластмасс в гранулах или порошках, экструзией
	ДВГО	Дискретный из волокна в водных суспензиях, осаждением
	ДВГН	То же напылением

(НВГ), из воздушных суспензий (НВВ) и из коврика, т.е. рулонных заготовок исходного сырья (НВК). Класс НП имеет один тип — из гранул или порошка (НПП). Класс ДВ имеет также один тип — из водных суспензий (ДВГ).

Перечисленные типы имеют следующие методы:

тип НПВ — метод осаждения (НВГО) и метод напыления (НВГН);

тип НВВ — метод осаждения (НВВО) и метод напыления (НВВН);

тип НВК — метод расчесывания (НВКР);

тип НПП — метод экструзии (НППЭ);

тип ДВГ — метод осаждения (ДВГО) и метод напыления (ДВГН).

Структурные связи систематизации технологических процессов производства бумаги показаны на рис. 3. Эта систематизация позволяет вклю-

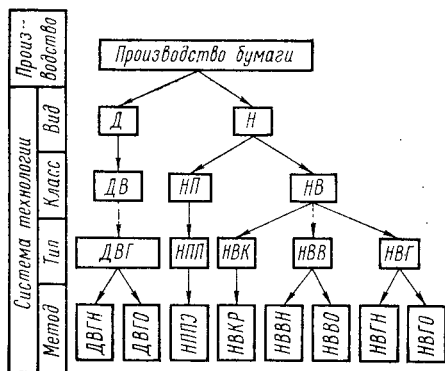


Рис. 3. Систематизация технологического процесса производства бумаги (пояснения см. в тексте)

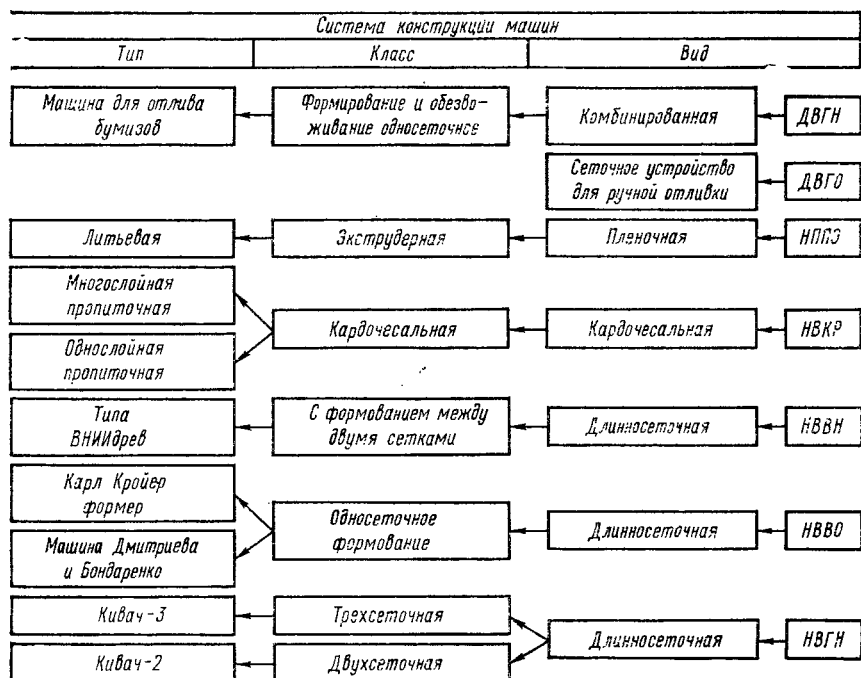


Рис. 4. Систематизация конструкций бумагоделательных машин

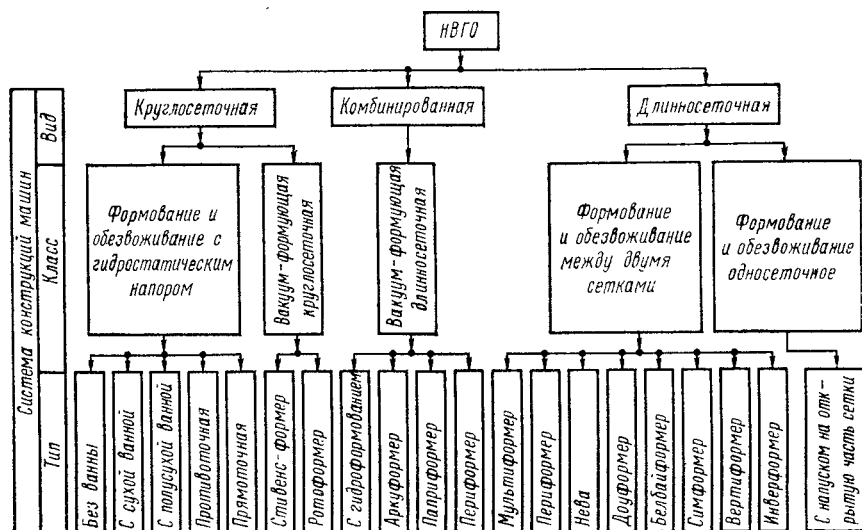


Рис. 5. Систематизация конструкций бумагоделательных машин для реализации метода НВГО

чать, не нарушая структуры технологии, дополнительные типы, классы и методы технологических процессов, если они появятся в будущем.

Логическим продолжением такого подхода является аналогичный анализ машин, реализующих эти технологические процессы и находящиеся в определенной зависимости от них. Систематизация машин также имеет свою иерархическую структуру (рис. 4, 5), включающую виды, классы и типы конструкций.

Вид конструкции определяется принципом и формой основного звена машины, которое образует полотно бумаги. В данном случае это устройство для формования полотна.

Класс конструкции определяется техническим решением, обеспечивающим избранный принцип отлива и формования полотна.

Наконец, *тип конструкции* определяется конструктивным исполнением машины, предназначенной для реализации конкретного метода технологии в соответствии с видом и классом.

Так, для промышленного производства бумаги по методу НВГО применяют три вида конструкций: длинносеточную, круглосеточную и комбинированную. Другие методы, например НВКР, реализуются кардочесальными машинами, производящими расчесывание волокна из ковриков. Метод НППЭ осуществляется экструдерными машинами для получения пленок.

Длинносеточные, круглосеточные и комбинированные машины делятся на классы по принципу применяемых устройств для обезвоживания и формования полотна бумаги или картона. Примером классов машин могут служить длинносеточные или круглосеточные, которые осуществляют совместное формование и обезвоживание при одностороннем отводе фильтрата.

Тип машины определяется конкретным конструктивным решением заданного технологического метода. Для реализации одного метода может быть несколько решений, которые конкурируют между собой по технико-экономическим показателям.

Показанная на примере промышленного производства бумаги систематизация технологии и конструкции машин может быть проведена для любого другого случая при сохранении принятого принципа. Орудия труда здесь играют важную роль, однако они являются лишь составной частью в общей иерархической структуре промышленного производства как такового.

Можно вычленить техническую базу, которую составляют орудия труда, по иерархическим уровням структуры народного хозяйства с учетом проанализированного процесса их развития. Такая иерархическая структура приведена на рис. 6.

Характерно, что рассмотренные выше этапы развития орудий труда органично вписываются в иерархию построения народного хозяйства по всем уровням управления. Совокупности орудий труда в соответствии с иерархическими уровнями образуют технические структуры, обусловленные функциональными связями всех звеньев.

Итак, систематизация орудий труда в иерархической структуре промышленного производства свидетельствует об их взаимосвязанности в различных уровнях управления народным хозяйством.

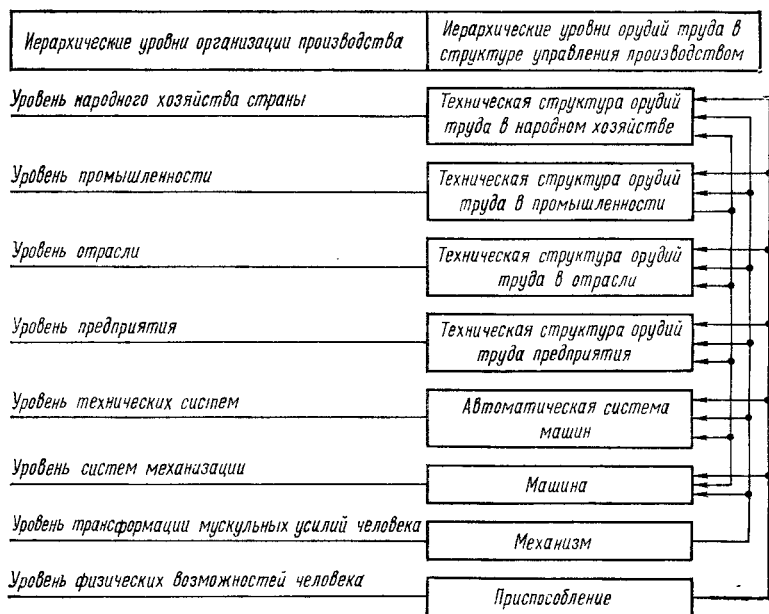


Рис. 6. Иерархическая структура орудий труда в народном хозяйстве

вом. Очевидно, что планирование сбалансированного технического уровня всех технических систем, используемых в народном хозяйстве, а значит, и их эффективности, будет успешным тогда, когда процессы их развития известны и могут быть использованы на практике.

1.4. Основные принципы развития технических систем

Причины, приводящие к изменению действительности, окружающей человека, издавна интересовали исследователей. Предметом изучения были в первую очередь естественные процессы, в сфере воздействия которых происходило развитие человеческого общества. Осмыслить и объяснить их пытались представители различных философских течений. Однако истинный смысл этих процессов не мог быть познан до тех пор, пока не были разработаны фундаментальные положения диалектического материализма и сформулированы основные его законы.

Академик Ю. А. Овчинников, рассматривая в этом аспекте значение учения К. Маркса, пишет: «Все эти вопросы давно волновали лучшие умы человечества, среди которых заметное место принадлежит выдающимся представителям немецкой философии, французского утопического социализма, английской политической экономии, передовой мысли России. Но лишь одному человеку посчастливилось впервые понять и отразить процессы, происходящие в человеческом обществе, найти их правильное толкование и, опираясь на опыт своих предшественников, создать стройное и революционное учение. Таким учением стал диалектический и исторический материализм — могучее орудие познания и преобразования мира, теоретическая основа освободительной борьбы рабочего класса» [46].

Вооруженные знаниями объективных законов развития материального мира, ученые смогли не только объяснить суть естественных процессов и явлений, но и научиться научно обоснованно пользоваться ими, синтезируя искусственные процессы, создавая новые материалы, разрабатывая все многообразие средств производства и управления, впитавших современные достижения науки и техники.

Однако разработка отдельных процессов и видов оборудования, даже самых совершенных, не может оказать существенного влияния на развитие общества до тех пор, пока не будет достигнут необходимый уровень сбалансированного развития основных отраслей народного хозяйства. Этим объясняется актуальность проблемы познания закономерностей развития не только окружающей человека действительности, но, в частности, всего, что создано человеком в качестве орудий труда.

Первые области науки, где исследователи пытались определить и описать закономерности развития, относятся к естествознанию. Давно было замечено, например, что рост популяций идет неравномерно во времени, сначала медленно, затем бурно с постепенным замедлением, приближаясь к некоторому пределу. Характерный пример такой картины приведен на рис. 7, где даны кривые роста популяции малого мучного хрущака, размножающегося в различной по количеству питательной среде. После увеличения по экспоненте рост численности популяции замедляется и стабилизируется на какое-то время, достигнув определенного уровня в зависимости от исходного количества муки. Количество особей в обоих случаях различно (в 16 г муки — 650, в 64 г — 1750). Характерно, что это зависит не только от количества пищи, так как стабилизация численности наступает задолго до истощения ее запасов, но и от того, что ее объем может обеспечить нормальные условия жизни лишь для ограниченного числа личинок, которые поедают друг друга, если испытывают неудобства от перенаселения.

В настоящее время общезвестно, что рост популяций, как и другие процессы развития, идет по S-образной, или логистической, кривой, хотя в действительности могут быть некоторые

отклонения во времени, принципиально не изменяющие общую закономерность (рис. 8) [44]. Этот закон в 1845 г. был открыт Верхолстом, затем через 80 лет изучен Раймондом Перлом (1870—1940), американским биологом и демографом. Кривая Перла сим-

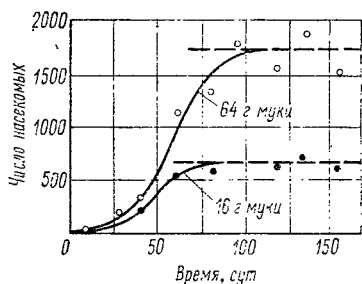


Рис. 7. Кривые роста популяции малого мучного хрущака (*Tribolium confusum*)

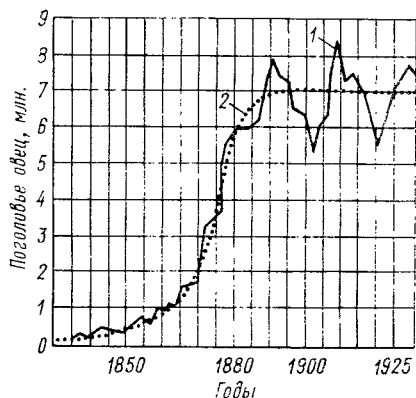


Рис. 8. Кривая роста поголовья овец в Австралии

1 — реальная кривая; 2 — теоретическая кривая

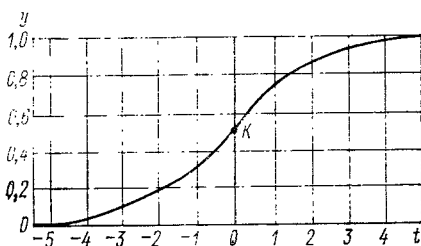


Рис. 9. Кривая Перла (K — точка перегиба)

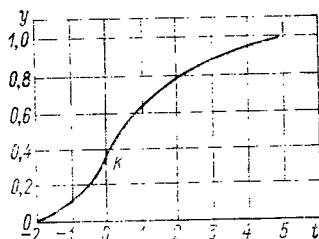


Рис. 10. Кривая Гомперца (K — точка перегиба)

метрична относительно точки перегиба (рис. 9) и имеет вид

$$y = L / (1 + a e^{-bt}), \quad (1.1)$$

где L , a , b — константы; t — время.

Соотношение Перла мало приспособлено для аппроксимации реальных закономерностей из-за симметричной формы кривой и невозможности «растянуть» ее по оси абсцисс или ординат, так как оно имеет всего три постоянных коэффициента: L , a и b .

В честь английского статистика и математика Бенджамина Гомперца (1799—1865) названа предложенная им для описания

подобных процессов развития другая, асимметричная относительно точки перегиба (рис. 10) кривая, которая имеет вид

$$y = Le^{-be^{-kt}}, \quad (1.2)$$

где L, b, k — константы; t — время.

Уравнение Гомперца несколько расширило возможности аппроксимации статистических данных процессов развития благодаря своей асимметричности, однако оно оставалось таким же «жестким» относительно осей абсцисс и ординат из-за наличия тех же трех постоянных коэффициентов, что и в уравнении Перла.

Подобные закономерности, описываемые соотношениями (1.1) и (1.2), можно наблюдать и в технике. Хронологические изменения параметров машин и систем описываются и другими математическими зависимостями:

- линейными $y = a + bt$;
- степенными $y = a + bt^n$;
- полулогарифмическими $\lg y = a + bt$;
- экспоненциальными $y = a + be^{kt}$.

Существует достаточно много математических приемов аппроксимации различных кривых, в том числе и произвольной формы. В настоящее время известно более 130 способов описания закономерностей развития различных систем [8]. Однако универсального способа для математического моделирования при обработке статистических данных развития различных процессов, которые, как правило, значительно сложнее, чем приведенные на рис. 7 и 8, до сих пор не имеется.

Причиной такого положения, на наш взгляд, являются попытки приспособить математический аппарат для аппроксимации изменения статистических данных за тот или иной период времени по внешним признакам, без глубокого анализа причин и следствий, обуславливающих локальные неравномерности развития исследуемых процессов. В самом деле, чрезвычайно трудно подобрать математическое выражение, например, для точной аппроксимации статистических данных динамики открытия элементов периодической таблицы Д. И. Менделеева (рис. 11) [18]. Очевидно, что процесс этого развития значительно сложнее, чем это может быть представлено математическими зависимостями, приведенными выше. Кроме того, сам характер изменения статистических данных (рис. 11) свидетельствует о наличии каких-то процессов, вызывающих не только глобальную неравномерность развития, но и локальные, которые здесь наглядно представлены. Аналогичные по сложности зависимости прослеживаются, например, на рис. 12 [20], 13 [44] и 14 [20]. Их также невозможно описать математическими выражениями, представленными выше.

Нельзя признать убедительным описание различных закономерностей так называемыми кривыми замещения [42], поскольку и в этом случае имеет место попытка искусственной аппроксима-

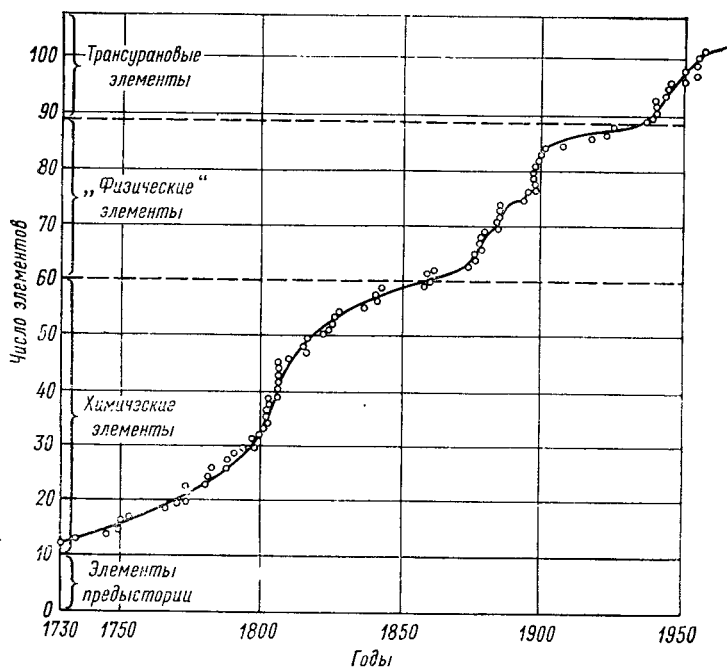


Рис. 11. Динамика открытия элементов периодической системы Д. И. Менделеева

ции S-образными кривыми старых и новых процессов развития без установления причинно-следственной связи между ними.

В своих исследованиях мы сделаем попытку распознать прежде всего причины и следствия локальных неравномерностей развития. Так уж устроен мир, что развитие любого процесса обусловлено воздействием законов диалектики. Например, при создании электрических двигателей конструкторы реализуют идею использования электромагнитной индукции для преобразования ее в механическое движение — вращение ротора. Целевая установка при этом — получение максимального крутящего момента с наименьшими потерями энергии, минимальный расход материалов, используемых для создания конструкции электродвигателя. И хотя разработка конкретной конструкции электродвигателя — всего лишь частный случай в электродвигателестроении, она несет в себе все качественные и количественные показатели, из которых складываются закономерности развития этой системы.

Подходя с диалектических позиций к процессу решения задачи создания конкретного электродвигателя, можно разделить все имеющие место факторы на две противодействующие группы: прогрессивные и регрессивные. В самом деле, научные идеи, технические достижения в виде материалов с высокими показателями, как электротехническими, так и механическими, направлены на дости-

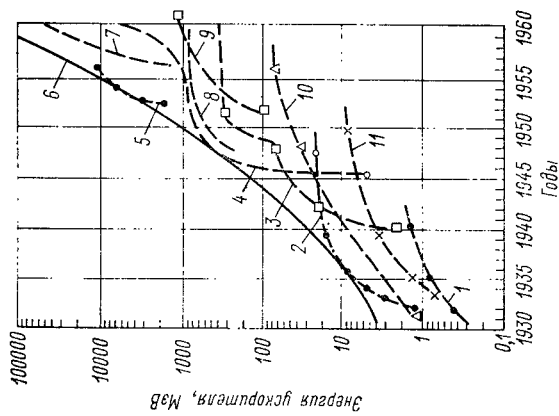


Рис. 12. Темпы роста энергии ускорителей частиц

1 — генераторы постоянного тока; 2 — циклотрон; 3 — бетатрон; 4 — электронный синхротрон; 5 — синхрофазотрон; 6 — огнистая кривая; 7 — синхротрон с жесткой фокусировкой; 8 — фазотрон; 9 — линейный ускоритель электронов; 10 — линейный ускоритель протонов; 11 — электростатический генератор

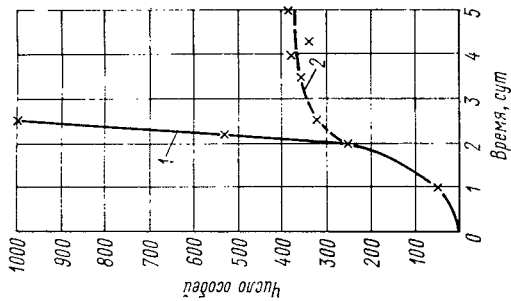


Рис. 13. Кривые роста популяции парамечий

1 — реальная; 2 — теоретическая

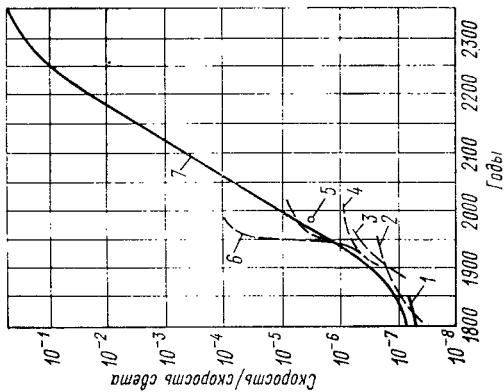


Рис. 14. Тенденция возрастания максимальной скорости механических средств передвижения

1 — конный экипаж; 2 — железнодорожный транспорт; 3 — автомобильный транспорт; 4 — авиатранспорт; 5 — сверхзвуковой транспорт; 6 — ракеты; 7 — огнистая кривая

жение высокой эффективности создаваемой конструкции. Но сама природа материального мира заставляет преодолевать одновременно действующие регрессивные факторы. Например, диэлектрические потери, снижение электрических и механических показателей материалов при неизбежном повышении температуры работающего электродвигателя из-за потерь энергии, да и само повышение температуры двигателя — это интегральные регрессивные показатели. В противоборстве прогрессивных и регрессивных факторов в данном случае проявляется один из законов диалектического материализма — единство и борьба противоположностей.

Ограничимся пока выявлением прогрессивных и регрессивных факторов как таковых, не рассматривая их роль в развитии систем во времени, к этому вопросу мы вернемся позднее. Отметим лишь, что их противоборство в конечном итоге в электродвигателестроении привело к созданию нескольких последовательных поколений конструкций. Появление каждого из последующих свидетельствует о переходе количественных изменений предыдущего поколения в качественные изменения последующего. Здесь же проявляется и закон отрицания отрицания, поскольку на опыте и самим существованием каждого предыдущего поколения электродвигателей обусловлено рождение нового, которое отвергло ранее существовавшее, обладая значительно превосходящими показателями.

Проиллюстрируем это на конкретном примере развития тех же электродвигателей. Как и для любой другой системы, для развития электродвигателей характерна непрерывная интенсификация технических параметров. Наиболее важные из них — мощность, КПД, удельная материалоемкость, габаритные размеры, масса. Тепловые потери как интегральный регрессивный фактор всегда противостояли эффективному достижению указанных параметров. Проследим эту закономерность.

Первое поколение электродвигателей, начиная с момента их создания, отличалось низкими значениями основных показателей, потому что не имело в своих конструкциях устройств для отвода образующегося тепла, кроме естественного охлаждения за счет перепада температур конструкций и окружающей среды. Увеличение мощности электродвигателей первого поколения приводило к их перегреву со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В борьбе с этим недостатком было создано второе поколение, которое ознаменовалось включением в конструкцию системы принудительного воздушного охлаждения. Эта мера позволила форсировать рост основных параметров электродвигателей, пока не были исчерпаны возможности охлаждения с помощью вентиляторов или централизованной системы принудительного охлаждения (в случае группового использования электродвигателей).

Третье поколение характерно использованием системы жидкостного охлаждения электродвигателей, показатели которой по теплообмену значительно превосходили воздушные системы, хотя и имели свои пределы.

Наконец, в настоящее время разрабатываются конструкции четвертого поколения электродвигателей, где будет использовано явление сверхпроводимости, которое обеспечивается использованием для охлаждения сжиженных газов при сверхнизкой температуре, близкой к абсолютному нулю.

Сегодня в народном хозяйстве используются в зависимости от эксплуатационных требований по существу все четыре поколения электродвигателей, однако их качественные показатели по эффективному использованию научно-технических достижений улучшаются от поколения к поколению.

Прослеженные взаимосвязи в развитии электрических двигателей характерны и для других видов техники. Это будет показано ниже. Здесь же следует подчеркнуть, что приведенные данные еще раз свидетельствуют о том, что объективные законы развития присущи не только естественным процессам, но и процессам создания человеком орудий труда. Наша задача — раскрыть их сущность, установить закономерности, чтобы пользоваться ими на практике.

1.5. Условия развития технических систем в период научно-технического прогресса

Для того чтобы охарактеризовать современные условия, в которых функционируют и видоизменяются технические системы, и выявить их особенности, необходимо проанализировать этапы развития науки и ее влияние на масштабы и темпы развития техники и производства.

Все последовательные ступени развития человеческого общества: первобытно-общинная, рабовладельческая, феодальная, капиталистическая и первая фаза коммунистической общественно-экономической формации характеризуются важнейшей особенностью — накоплением знаний. Процесс этот сопровождается также стремлением к совершенствованию методов познания. Когда накопленные знания позволили сформироваться наукам, они, непрерывно развиваясь и совершенствуясь, стали играть все более важную роль в жизнедеятельности человеческого общества.

Различают два этапа развития науки в период до XX в.: неорганизованное накопление знаний на базе наблюдений и размышлений; зарождение науки и создание человеком машин (XVIII в.). В XX в. роль науки становится все более активной, она воздействует на развитие человеческого общества как непосредственно, так и через использование новой техники, новых технологических процессов через сферу планирования и управления. Наука, бывшая до этого времени относительно самостоятельной областью деятельности человека, пронизывает теперь почти все области практической деятельности общества. Она превращается в материально-творческую науку, предметно воплощающуюся в результатах человеческой деятельности.

Наука постепенно становится непосредственной производительной силой, стимулируя зарождение и развитие научно-техниче-

ского прогресса и переход его в фазу научно-технической революции.

Раскроем сущность этих понятий.

Марксистско-ленинская трактовка прогресса, в том числе научно-технического, базируется на материалистическом понимании истории и характеризуется диалектико-материалистическим подходом к проблеме развития, т. е. перехода от низшего к высшему, от менее совершенного к более совершенному.

Если рассматривать научно-технический прогресс и научно-техническую революцию в целом, то научно-технический прогресс — понятие значительно более широкое. Научно-техническая революция является составным элементом общественного прогресса, она имеет взрывообразный характер и качественно выделяется, представляя собой наиболее активный этап его развития. Несмотря на то, что сущность понятия научно-технического прогресса и научно-технической революции, их социально-экономические последствия являются предметом всестороннего изучения и широко рассматриваются в современной философской, экономической и социологической литературе, общепринятых определений до настоящего времени не выработано. Мы будем руководствоваться определением, данным в работе [33] на основе марксистско-ленинской теории. Научно-техническая революция — «это коренные, качественные изменения в производительных силах как целостной системе, вызываемые слиянием развития науки, техники и технологии производства в единый процесс и охватывающие все три основных компонента указанной системы, т. е. средства труда, предмет труда и целесообразную деятельность человека, „самый труд“».

Научно-техническая революция имеет характерные черты, это:

- стремительность, динамизм, растущие масштабы;
- превращение науки в производительную силу;
- качественные изменения производства средств производства, технологии, организации и управления производственными процессами;
- автоматизация в процессе взаимоотношений человека и техники, повышение требований к квалификации и интеллектуальной подготовке кадров;
- качественный переворот в технике, технологии, науке, включая главную производительную силу — человека с его способностью трудиться;
- широкие возможности для реализации завоеваний техники, которой вооружен человек;
- глобальность характера, затрагивающая все человеческое общество;
- взаимное влияние качественного изменения науки и техники, а также всей системы экономических связей и механизма управления народным хозяйством.

Объективный критерий достижений общественного прогресса следует искать в уровне развития производительных сил общества.

Научно-технический прогресс характеризует общественно-экономическую формацию, которая в свою очередь включает в себя способ производства, в том числе производительные силы, науку, технику, политику, классовые и национальные отношения, духовную жизнь, культуру и быт народа.

Орудия труда характеризуют уровень производства и являются показателем достигнутой обществом ступени экономического развития: «Экономические эпохи различаются не тем, что производится, а тем, как производится, какими средствами труда» [1].

Главный аспект общественного развития — производительные силы — изменяется непрерывно. Производственным отношениям свойственна прерывность и специфичность конкретных форм. Их взаимосвязь заключается в том, что более высокому уровню производительных сил соответствует и более сложная форма производственных отношений, которые ускоряют или тормозят развитие производительных сил.

Таким образом, технические системы находятся всецело под воздействием всех проявлений научно-технического прогресса. Что же касается воздействия научно-технической революции, то, на наш взгляд, ее главная фаза пока не наступила, ибо это возможно лишь при сбалансированном уровне развития всех компонентов способа производства общества, приводящих к взрывообразному росту производительности его труда.

Академик П. Л. Капица [30], анализируя научные проблемы ближайшего будущего, дает им основную характеристику, связанную с глобальностью решений, а именно:

- технико-экономическую, связанную с истощением природных ресурсов земного шара;

- экологическую, связанную с биологическим равновесием человека с живой природой и антропогенными влияниями;

- социально-политическую, связанную с необходимостью решения современных проблем в масштабах всего человечества.

Кроме того, интенсификация технологических процессов, свойственная всем современным отраслям народного хозяйства и приведшая к резкому росту быстродействия средств производства, вызвала повышение темпов развития не только в самом производстве, но и в оперативности принимаемых решений при планировании и управлении.

Наконец, бурный рост научной и технической информации, свидетельствующий о переходе в науке от метода проб и ошибок к установлению причин и следствий, ярко отражает качественную сторону роста новых знаний. Это в свою очередь не может не привести к качественному скачку при их использовании в народном хозяйстве. Некоторой иллюстрацией сказанному могут служить данные, характеризующие количество (табл. 1.3) и рост (рис. 15) публикаций по физике в ведущих странах мира [30].

Не рассматривая качественную сторону кривой рис. 15, что будет сделано позднее, отметим лишь бурный рост объема публикаций в послевоенные годы, столь характерный и для других

Т а б л и ц а 1.3. Число журналов и рефератов по физике [30]
(данные на начало 60-х гг.)

Вид публикаций	Страны						
	США	СССР	Англия	Япония	Франция	ГДР и ФРГ	Голландия
Журналы	71	24	62	37	14	47	14
Рефераты	6316	3317	2729	1560	1268	1240	1043

наук. Динамичное развитие научных знаний привело также к появлению многих новых видов техники, быстрой смене одних поколений машин другими. Как будет показано ниже, даже для уникальных технических систем в настоящее время срок морального старения не превышает 15—20 лет. Этому способствует также появление новых высокоэффективных материалов, что позволяет разрабатывать и создавать технические средства с интенсификацией процессов и эффективностью, намного превосходящей предыдущие поколения.

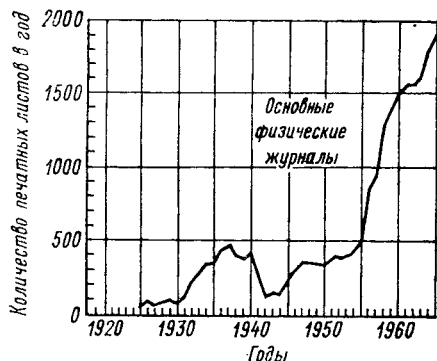


Рис. 15. Рост объема научных публикаций по физике в основных физических журналах

Вместе с тем на реализацию этих высокоэффективных средств производства большой единичной мощности требуются большие материальные затраты, а также большие затраты труда. Отношение времени, потребного на разработку и создание современных технических систем, к периоду их морального старения постоянно растет. Все это увеличивает ответственность специалистов,

планирующих технические параметры создаваемых систем, поскольку как завышенные, так и заниженные технические показатели приводят к недостаточно эффективному использованию создаваемых средств производства.

Итак, крупномасштабность народнохозяйственных затрат, глобальность последствий, высокие темпы качественного обновления и совершенствования современных технических систем являются условиями, в которых эти системы создаются и функционируют, что и предопределяет актуальность овладения закономерностями их развития. Это необходимо не только для того, чтобы перейти от эмпирического способа планирования и прогнозирования к научно обоснованному, но и чтобы создать предпосылки к рациональному управлению процессом сбалансированного развития народного хозяйства.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Как уже отмечалось, проблемы закономерностей развития технических систем практически не изучены и фундаментальные исследования в этой области отсутствуют. Вышедшая недавно в свет монография «Большие технические системы. Анализ и прогноз развития» [51] и работа авторов [50], явившиеся значительным вкладом в методологию анализа и прогнозирования развития больших технических систем, также не освещают закономерностей их развития. Это приводит к спорной трактовке, в частности, функций автоматов как явления парадоксального [51, с. 28], а также к постановке непосильной, на наш взгляд, задачи оптимизации развития больших технических систем без овладения закономерностями этого процесса. Попытаемся выявить эти закономерности, основываясь на том, что они существуют объективно, и разработать математическую модель, пригодную для аппроксимации статистических данных и для прогноза развития технических систем с достаточной степенью точности.

2.1. Характеристики технических систем

Главной характеристикой технических систем как орудий труда следует считать их эффективность, которая определяет степень совершенства как самой системы, так и условий ее эксплуатации. Это относится прежде всего к системам, выполняющим основные производственные функции. Поскольку эффективность является показателем интегральным, она будет рассмотрена особо. Здесь же проанализируем другие важные свойства систем.

Рассмотрим характеристику технических систем с позиций их *функционального назначения*. Как компонент всей совокупности средств производства системы можно объединить по признаку выполняемых функций в следующие группы: для получения энергии; для получения материальной продукции; для выполнения функций управления.

В зависимости от целевой установки производственные системы могут использоваться в различных комбинациях или комплексно. Комбинация систем — наиболее часто встречающаяся форма, при этом их технические характеристики являются функцией заданных параметров общей системы. Как уже отмечалось, независимо от назначения, любая техническая система включает в себя

следующие части: двигательную; для передачи энергии; исполнительную; кибернетическую.

По *технологическому назначению* технические системы могут выполнять непрерывный либо дискретный процесс. Отсюда вытекают принципы конструктивного и аппаратного оформления каждой конкретной системы. При этом эффективность систем во многом определяется возможностями реализуемой технологии и конструктивного оформления, а также минимизации потерь времени на холостые хода рабочих органов. Таким образом, уровень эффективности конструкций во многом зависит от степени совершенства принципиальных схем, положенных в их основу, и от качества их реализации на всех этапах разработки и эксплуатации.

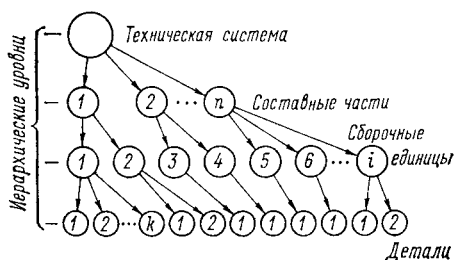


Рис. 16. Структурная схема большой технической системы в общем виде

Основная функциональная особенность современных технических систем как наиболее совершенных средств производства заключается в специфической роли человека во взаимоотношениях с ними. Эти взаимоотношения во многом определяются классовой структурой общества, в котором они реализуются. Мы будем рас-

сматривать эти вопросы в условиях социалистического общества.

Специфичность роли оператора технической системы заключается в том, что он непосредственно осуществляет лишь часть управленческих функций, поскольку современные средства автоматизации способны не только автоматически управлять отдельными операциями и технологическим процессом в целом, но и вести его при оптимальном соотношении технических параметров. За человеком остается главная часть — составление программы, которую реализуют автоматы, а также контроль за точностью ее исполнения. Причем исполнение такой программы во времени сопряжено с непрерывно меняющимися условиями внешней среды, которые могут быть благоприятными или неблагоприятными. В этих условиях интуиция человека, его способность анализировать прямые и косвенные связи параметров, давать качественную оценку ситуациям, т. е. способность человека мыслить, естественно, никакими автоматами и вычислительными машинами заменить невозможно. Таким образом, интеллект оператора является областью, недостижимой для его синтезированного партнера — технической системы, несмотря на наличие в ней кибернетической части.

Рассмотрим функциональную структуру технической системы. В иерархическом плане она может быть изображена лишь в общем виде (рис. 16), так как наличие в ней тысяч, а иногда и сотен тысяч компонентов чрезвычайно усложняет морфологическое опи-

сание, физически не позволяет представить ее полную структурную модель.

Иерархические уровни функциональной структуры, определяя целевую установку системы в целом, реализуются одинаковыми для всех систем методами, которые положены в основу Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Руководствуясь принципами ЕСКД, разработчики создают любую техническую систему. Как показано на рис. 16, она состоит из сборочных единиц и деталей, которые могут быть оригинальными, унифицированными или стандартными.

Функциональная структура технической системы является всеобъемлющей, так как из ее компонентов можно получить любые частные структуры. Например, структурную схему надежности можно вычленил путем следующих преобразований [29]:

— перегруппировки составных частей функциональной структуры в соответствии с понятиями об устройствах и элементах;

— исключения устройств и элементов, наработка на отказ которых равна или больше периода нормальной эксплуатации системы, и т. п.

В результате этих трудоемких преобразований вычленяется структурная схема надежности, логической основой которой являются взаимные связи ее составных частей, необходимые для анализа надежности. Схема учитывает функциональное взаимодействие и логические связи элементов и устройств системы, обеспечивающие надежность реализации заданного технологического процесса. Аналогичным путем из структурной схемы можно вычленил составные части, из которых слагаются принципиальная схема, схема управления, какая-либо вспомогательная система и т. д.

На практике, разумеется, громоздкие структурные схемы технических систем не составляют. Однако построение любых частных схем и структур возможно только на этой базе, используемой в виде конструкторской спецификации.

Любую машину или систему принято характеризовать техническими параметрами, которые делятся на главные и основные. Как уже отмечалось, главным показателем технической системы является ее эффективность, которая, как будет показано, является функцией максимизации производительности и минимизации затрат. Иными словами, эффективность — это критерий технико-экономический.

Главный технический параметр бывает, как правило, один; это параметр интегральный, он является наиболее важной технической характеристикой. Например, для орудий труда — это производительность; для бумагоделательных машин, в частности, это суммарный выпуск бумаги в сутки или в год:

$$Q = kqbv, \quad (2.1)$$

где k — безразмерный коэффициент; q — плотность бумаги, г/м²; b — ширина машины, м; v — скорость машины, м/мин.

Главный параметр включает все или часть основных параметров, которые представляют собой важнейшие технические характеристики системы; в нашем случае — это скорость машины и ширина полотна выпускаемой бумаги. Если для двигателя внутреннего сгорания главный показатель — мощность, то к основным его показателям относятся: частота вращения коленчатого вала, расход горючего, удельная металлоемкость и т. п.

Каждая машина или система имеет еще и ряд вспомогательных технических параметров, отображающих частные характеристики. Для бумагоделательной машины, например, это удельный провал волокна и наполнителей в подсеточные воды; для двигателя внутреннего сгорания — степень сгорания топлива или уровень вредности выбросов продуктов сгорания и т. п. Сумма главных, основных и вспомогательных показателей любой машины (или совокупности в виде технической системы) является воспроизведением ее характеристик как объекта изучения с помощью специально созданной модели.

В дальнейшем при изучении закономерностей развития технических систем мы будем пользоваться анализом именно таких моделей, поскольку исследование самих объектов ввиду их сложности практически невозможно. Важно, чтобы модели обладали достаточно точным подобием изучаемым объектам, с необходимой полнотой описывали их качественные и количественные характеристики.

Итак, исходя из структурно-морфологического анализа технических систем, вычленим наиболее важные характеристики:

- эффективность как интегральный показатель;
- технические параметры как основу для моделирования;
- роль оператора в функционировании систем, что отражает степень комплексности автоматизации управления.

2.2. Методика анализа процессов развития технических систем

Мы будем исходить из общих принципов исторического материализма, которые характеризуют орудия труда как определяющий вещественный и наиболее подвижный элемент производительных сил, главная роль в которых принадлежит человеку. Основываясь на этой концепции и положениях, изложенных в гл. 1, будем рассматривать технические системы как объект непрерывно развивающийся. Являясь делом рук человека, материализацией накопленного опыта и знаний, они характеризуют успехи в освоении человеком природы. Как было выяснено, человек при этом также претерпевает определенную эволюцию, что подтверждается изменением его функций в процессе развития орудий труда.

Учитывая, что этот процесс находится под постоянным воздействием объективных законов, сформулируем общие методические принципы, необходимые для анализа развития технических систем.

1. Непрерывное, прогрессивное и последовательное во времени развитие объектов исследования (их моделей — главных параметров).

2. Развитие главных параметров, ограниченное пределом, определяемым принятым способом реализации целевой установки.

3. Полное соответствие закону неравномерности развития. Качественный анализ причин и следствий локальных и глобальных неравномерностей развития во времени.

4. Наличие необходимых и достаточных статистических данных, достоверно отображающих ретроспективное развитие исследуемого объекта (модели).

5. Проведение причинно-следственного анализа закономерностей развития исследуемого объекта людьми, являющимися специалистами в соответствующих областях науки и техники.

6. Использование только явно выраженных тенденций с исключением нехарактерных статистических данных и причин, приведших к утрате, снижению достигнутых позиций на определенное время или к их завышению.

Последний пункт требует особого разъяснения. Сделаем это, проанализировав кривую роста объема научных публикаций по физике, изображенную на рис. 15. Нехарактерным в данном случае является снижение объема научных публикаций в период второй мировой войны. Причины, вызвавшие это снижение, для данного анализа не могут быть признаны объективным фактором, воздействующим на процесс развития публикаций. Во всяком случае, уровень достигнутых человечеством научных знаний, в том числе и в этой области, не снизился за период второй мировой войны; в некоторых областях он повысился, притом значительно. Объем публикаций в этот период по другим причинам не мог быть адекватным отображением процесса накопления знаний по физике. Остальные участки кривой являются достоверным подтверждением выявленных нами закономерностей. В целом кривая соответствует перечисленным выше шести общим принципам анализа развития, хотя и не отображает развития какой-либо технической системы. В дальнейшем будет показано, что выявленные закономерности характерны и для других процессов, в том числе для изображенного на рис. 15.

Аналогичная зависимость прослеживается и для технических систем. На рис. 17 приведены данные изменения во времени ширины создаваемых бумагоделательных машин [63]. Участок резкого падения ширины при нашем исследовании также не может быть принят во внимание, т.е. в техническом отношении такое явление не может быть оправданным. Использованные автором

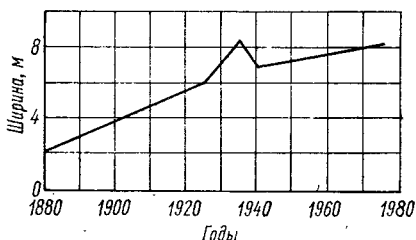


Рис. 17. Изменение ширины бумагоделательной машины по данным [63].

[63] статистические данные скорее являются некорректными, так как наши исследования этого явления не подтвердили (см. рис. 22).

2.3. Анализ развития бумагоделательных машин как технических систем

Особенности бумагоделательных машин как технических систем

Прежде всего следует обосновать принадлежность бумагоделательных машин к техническим системам. Ранее мы определили их как объективные единства пригодных к усовершенствованию машин, включающих части: двигательную, передающую энергию, исполнительную и кибернетическую, способные реализовать полный технологический цикл.

Авторы работ [50, 51] понимают под большой технической системой (БТС) «условно ограниченную в пространстве и во времени совокупность технических средств, имеющую единое целевое назначение, а также следующие особенности:

а) по структуре — большое, как правило, меняющееся число элементов, организованных в виде входов (воздействие внешней среды), процессора (собственно элементов системы) и выходов (воздействие на внешнюю среду);

б) по связям между элементами — сложность и разнообразие изменяющихся во времени качественно и количественно прямых и обратных связей, имеющих иерархическую организацию;

в) по управлению — обязательное наличие в структуре собственно системы (процессора БТС), решающего устройства или подсистемы (либо, наконец, аналога такого типа), минимизирующих рассогласование между заданными и действительно реализованными выходами;

г) по поведению — обязательное наличие единой целевой функции, реализуемой в некотором, как правило, ограниченном множестве операций (под операцией понимается целенаправленное действие) с наложением системы линейных или чаще нелинейных ограничений; следовательно, поведение БТС всегда характеризуется большей или меньшей «функциональной неопределенностью».

На этом понятии будем основываться при оценке бумагоделательных машин как технических систем.

Современная бумагоделательная машина (рис. 18) имеет целевое назначение осуществлять непрерывное физическое превращение полуфабриката (волокнистой суспензии) из жидкого состояния в твердое упругое тело (готовая бумага) при одновременной непрерывной последовательной транспортировке по технологическим операциям. Производительность ее по этим причинам всегда большая: например, при производстве газетной

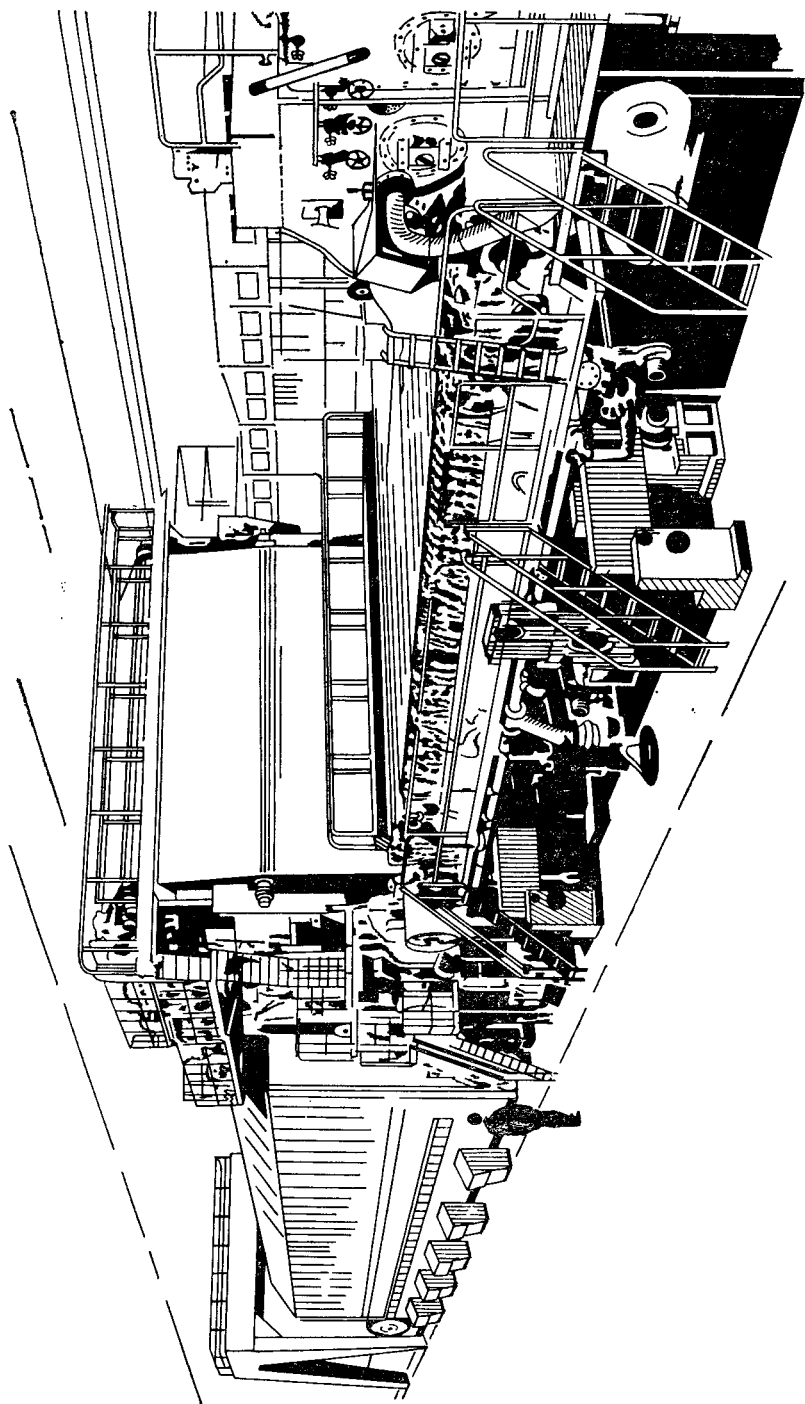


Рис. 18. Вид современной бумагоделательной машины (первый технологический ярус и ярус теплорекуперационного оборудования)

бумаги она составляет 180 тыс. т в год. Машина располагается в специально построенном для нее здании на трех технологических ярусах: первый — вспомогательные системы, второй — собственно машина, третий — теплорекуперационное и вентиляционное оборудование.

Машина включает все характерные для технических систем составные части:

- двигательную (регулируемый и нерегулируемый многодвигательный электромеханический привод, включающий электрические, гидравлические и пневматические приводные системы) суммарной мощностью до 25 МВт;

- передающую энергию (механический привод, паро-, гидро-, пневмопроводы и система транспортировки полуфабриката по технологическим операциям);

- исполнительную (система устройств, предназначенных для подготовки полуфабрикатов, подачи суспензии на машину, отлива бумажного полотна, прессования, сушки, каландрирования, намотки, отделки бумаги, а также для выполнения многочисленных вспомогательных операций);

- кибернетическую (система автоматического поддержания синхронности линейных скоростей приводных секций, система автоматического управления машинами для основного и вспомогательных технологических процессов, автоматизированная система управления технологическим процессом и т. п.).

Бумагоделательная машина самостоятельно функционирует круглосуточно, ею управляет бригада операторов в составе 7—8 человек, основная роль которых сводится к надзору и контролю за выполнением заданных технологических параметров и принятию решений при возникновении ситуаций, выходящих за пределы штатного технологического регламента. Таким образом, за операторами остаются функции в основном интеллектуального типа (это особенно характерно для нормального рабочего режима эксплуатации).

Пригодность бумагоделательных машин к усовершенствованию на протяжении всей истории их существования будет показана ниже.

Соответствие бумагоделательных машин техническим системам, согласно определению, приведенному в работах [50, 51], также подтверждает их принадлежность к этому виду средств производства:

- а) по структуре — большое число элементов, организованных в виде входов, процессора и выходов (суммарное число только управляемых операций на переходных режимах превышает 450, на рабочих режимах — 250);

- б) по связям между элементами — сложность и разнообразие изменяющихся во времени связей, имеющих иерархическую организацию (число наименований деталей составляет более 20 тыс., всего деталей — более 300 тыс.; одновременно реализуется несколько тысяч операций основного и вспомогательного процессов,

включающих электрические, гидравлические, механические, пневматические и паровые системы, управляемые АСУТП);

в) по управлению — система автоматизации, включая АСУТП с современными вычислительными машинами;

г) по поведению — наличие единой целевой функции (все системы бумагоделательной машины подчинены реализации единой цели — переработке полуфабриката в готовый продукт, при функциональной неопределенности во времени большого числа управляемых технологических операций).

Если учесть к тому же уникальность бумагоделательных машин как сооружений (масса машины до 8 тыс. т, габаритные размеры: длина — до 170 м, ширина — до 14 м, высота — до 22 м), то их принадлежность к техническим системам не вызывает сомнений.

Функциональные особенности бумагоделательных машин

Как уже отмечалось, бумагоделательная машина была изобретена в начале XIX в. Луи Робером, и к настоящему времени ее конструкция претерпела значительные усовершенствования, что позволяет отнести ее к техническим системам.

В настоящее время Советский Союз занимает первое место в мире по запасам леса, располагая примерно 25 % лесопокрытой площади земного шара. СССР лидирует также в общем объеме лесозаготовок. Исследования сырьевых ресурсов страны определяют возможность дальнейшего роста объемов использования древесины для химической и механической переработки за счет освоения лесных запасов Сибири и Дальнего Востока. Таким образом, в нашей стране, как и в мире в целом, сохраняется тенденция роста объемов целлюлозно-бумажного производства. Это значит, что будет уделяться должное внимание развитию лесоперерабатывающих отраслей, и в частности целлюлозно-бумажной промышленности, поскольку главное условие развития любого вида производства — наличие сырья — в данном случае обеспечено (особенно если учесть воспроизводимость древесины).

Отечественная целлюлозно-бумажная промышленность длительное время (по существу до начала 60-х гг.) развивалась на базе импортного оборудования. Это наложило определенный отпечаток на темпы ее развития и уровень организации производства. Между тем современное целлюлозно-бумажное производство вобрало в себя лучшие достижения смежных отраслей народного хозяйства (химической промышленности, средств автоматизации и вычислительной техники, электромашиностроения, приборостроения, металлургии и ряда других) и достигло высокой степени интенсивности. Начиная с 60-х гг. в СССР сформировалась подотрасль целлюлозно-бумажного машиностроения со значительным производственным потенциалом, решена основная задача по освоению производства новых видов современного оборудования. Стро-

ительство современных в техническом отношении заводов, подготовка кадров позволили накопить соответствующий опыт, изготовить и пустить в эксплуатацию ряд уникальных современных технологических потоков для производства целлюлозы, бумаги и картона.

Рассмотрим функциональные особенности бумагоделательных машин — базового вида оборудования в целлюлозно-бумажном производстве.

Характерной особенностью бумагоделательной машины, предназначенной для получения бумаги из водоволокнистой суспензии, является ее способность к непрерывному изменению физического состояния полуфабриката и его транспортировке, т. е. к реализации непрерывного технологического процесса. Вкратце он заключается в следующем: целлюлозное волокно в смеси с древесным волокном, полученным механическим способом путем дефибрирования древесины с различными наполнителями и проклеивающими веществами, в соответствующих пропорциях смешивают в воде, тщательно перемешивают, очищают от инородных включений и транспортируют по трубопроводам для подачи на машину. Приготовленная таким образом суспензия имеет ряд преимуществ; это, в частности, примерно одинаковый удельный вес набухшего в воде волокна и самой воды, что способствует хорошему перемешиванию и удобству транспортировки. Отрицательное качество такой суспензии — способность волокна образовывать флоккулы, поэтому для того чтобы получить хорошее качество бумаги из водоволокнистой суспензии, необходимо обеспечить высокую диспергированность волокон в потоке суспензии.

Длительное время эти вопросы решались эмпирически. Только благодаря работам советских ученых [25, 35, 36, 55] в настоящее время мы имеем возможность управлять этим процессом научно обоснованно. Теория и инженерные методы организации гидродинамического потока с заданными свойствами в устройствах для напуска суспензии на бумагоделательных машинах (равномерное перемешивание, отсутствие турбулентности при выходе на сетку) базируются на использовании свойств суспензии как жидкого тела. Технологический процесс включает также напуск на бесконечную металлическую или синтетическую сетку суспензии для формирования бумажного полотна путем осаждения волокна на сетку. Получение необходимой скорости жидкости при напуске на синхронно движущуюся сетку обеспечивается напором, а ее равномерность по ширине обеспечивают специальные перемешивающие и регулирующие устройства.

Таким образом, при подготовке выходных параметров волокнистой суспензии и ее транспортировке в напускном устройстве на сетку бумагоделательной машины используются законы гидродинамики. С момента попадания струи на сетку начинаются интенсивное удаление воды путем фильтрации и механическая транспортировка полуфабриката, обеспечивающая непрерывность процесса дальнейшей переработки.

Принципиальная схема бумагоделательной машины представлена на рис. 19. В конце сеточного стола осевшие волокна (вода проваливается под сетку сначала под действием земного тяготения, а затем на обезвоживающих элементах, использующих специальный гидродинамический профиль деталей, контактирующих с сеткой, а также вакуум) образуют полотно, имеющее некоторые свойства твердого тела — прочность и упругость. Сухость полотна в конце сетчатого стола составляет около 20 %.

Далее происходит обезвоживание полотна механическим путем на прессовой части, которая также имеет принудительный отвод воды из полотна, и сушка бумаги в сушильной части машины. Затем осуществляется уплотнение бумаги, поверхностная отделка как упругого материала на каландрах и намотка в рулон на специальных устройствах, называемых накатами.

Таким образом, можно сформулировать первую функциональную особенность бумагоделательной машины: осуществление непрерывного физического превращения полуфабриката из жидкого состояния в упругое твердое тело при одновременной непрерывной и последовательной транспортировке по технологическим операциям. Эта особенность обуславливает высокий технический уровень организации изготовления бумаги при непрерывном поступательном движении полуфабриката на высоких скоростях, т. е. с большой удельной производительностью,

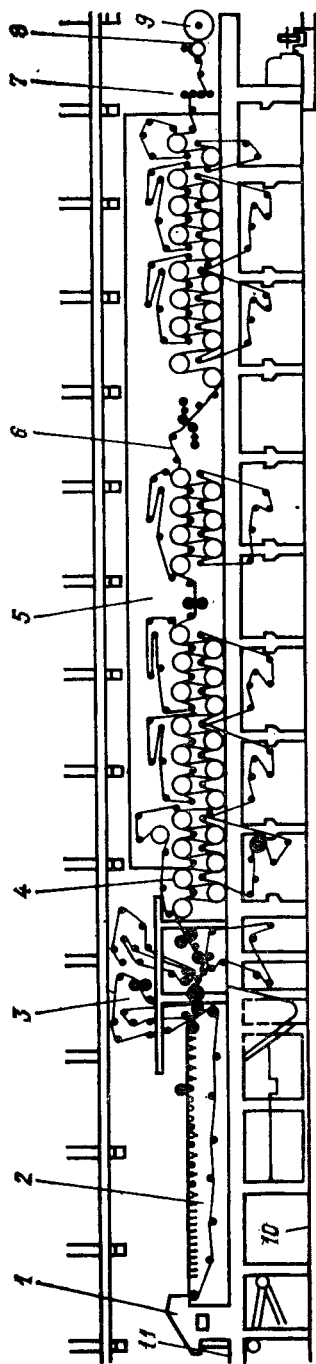


Рис. 19. Принципиальная схема плоскосточной бумагоделательной машины

1 — напорный ящик; 2 — сеточная часть; 3 — прессовая часть; 4 — сушильная часть; 5 — сушильный вал с рулоном бумаги; 6 — полотно; 7 — вентиляционный колпак; 8 — накат; 9 — тандемный вал с рулоном бумаги; 10 — ярус основного технологического оборудования; 11 — ярус вспомогательного оборудования

которую практически невозможно достичь при дискретном процессе. Процесс непрерывной переработки и транспортировки полуфабриката дает возможность полной механизации и автоматизации производства и максимального использования эффективного времени работы машин. Степень автоматизации (под этим термином понимается отношение количества автоматизированных операций к общему числу операций в машине) представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Степень автоматизации отечественной бумагоделательной машины Б-15 для выработки газетной бумаги на скорости 800 м/мин (обрезная ширина 6720 мм)

Показатели автоматизации	Переходный режим	Степень автоматизации *	Рабочий режим *	Степень автоматизации*
Уровень информационных показателей	350/450	77	200/230	87
Степень механизации	320/450	71	170/230	74
Степень автоматизации	140/450	31	150/230	65

* Отношение числа управляемых операций к их общему числу.

Из данных таблицы видно, что бумагоделательная машина имеет высокую степень автоматизации (65 %) и механизации (74 %) не только на установившемся режиме работы, но и на переходных режимах, когда происходит отладка параметров ее работы. Приведенные в таблице данные относятся к ординарной среде создаваемых в настоящее время машине. Можно сделать вывод о высокой степени автоматизации современных бумагоделательных машин, в которых широко используются автоматические системы управления технологическими процессами.

Высокий уровень механизации и автоматизации технологических процессов, интенсификация операций обезвоживания, пресования, сушки, отделки, транспортировки полотна бумаги позволяют сформулировать вторую особенность бумагоделательных машин — их высокую энергоемкость. Целлюлозно-бумажная промышленность занимает четвертое место, а в целом по энергетическим затратам — пятое среди других энергоемких отраслей промышленности [57]. Бумагоделательные машины также находятся в ряду самых энергоемких для автоматизированных видов оборудования, а в целлюлозно-бумажной промышленности в этом отношении они являются лидерами.

В табл. 2.2, составленной по материалам Государственного института по проектированию предприятий целлюлозно-бумажной промышленности и Центрального научно-исследовательского и проектно-конструкторского института бумагоделательного машиностроения, а также по данным работы [53], показано, что по удельным расходам энергии при выработке 1 т продукции бумага и картон уступают лишь ферросплавам. В целом же затраты на

Таблица 2.2. Удельные расходы энергии, потребные для изготовления 1 т различных видов продукции

Наименование продукции	Электроэнергия, кВт·ч	Теплота, гкал	Общий расход энергии, гДж	Наименование продукции	Электроэнергия, кВт·ч	Теплота, гкал	Общий расход энергии, гДж
Ферросплавы	9950	—	35,8	Цемент	111	1,6	8,3
Бумага	550	2,6	12,9	Цветной прокат	1100	—	3,9
Картон	480	2,3	11,3	Древесная масса	1150	—	3,96
Целлюлоза	330	2,1	9,8	Стекло	75	—	0,27

обеспечение теплом, водой, электроэнергией на современных целлюлозно-бумажных предприятиях составляют 10—15 % себестоимости выпускаемой продукции.

Третья функциональная особенность бумагоделательной машины — способность выполнять высокоточные по техническим параметрам технологические операции, требующие соответствующей точности изготовления основных сборочных единиц и деталей, а также чистоты поверхности рабочих органов, соприкасающихся с полуфабрикатом и готовой продукцией.

Большие массы (5—15 т) деталей и механизмов, вращающихся с линейной скоростью 1100 м/мин и более, большая ширина обрабатываемого полотна (до 10 м) требуют высокой синхронности линейных скоростей рабочих поверхностей (точность рассогласования до 0,02 %). Это обуславливает соответствующие требования к изготовлению основных деталей по качествам 1 и 2 (каландровые и прессовые валы, сушильные цилиндры, детали напускных устройств, сеточный стол и т.д.). Многофакторные взаимозависимые ситуации, имеющие место при эксплуатации современной бумагоделательной машины, потребовали создания системы оптимизированного программного управления, поскольку оператор, управляющий машиной, уже не способен решать эту задачу с необходимым быстродействием. Например, для обеспечения выпуска бумаги с заданным допуском массы 1 м² на скорости 1000 м/мин необходимо одновременное управление рядом взаимосвязанных параметров технологического процесса и самой машины. К ним относятся качественные показатели водоволокнистой суспензии, параметры работы напускного устройства, вакуумной системы, системы подачи пара и удаления конденсата, влажности полотна, точности регулирования скорости между секциями и т.п. Выполнение этих функций операторами практически невозможно из-за их низкого быстродействия и различных субъективных качеств. Попытки заменить действие оператора обычными средствами автоматического регулирования оказываются столь же нереальными, как и возможность заранее предвидеть все многообразие соотношений различных ситуаций из-за неопределенности их влияния на протекающий процесс. Рациональное решение такой задачи обес-

печивается лишь путем создания автоматической системы управления технологическим процессом по заданной программе, в которой оператору отводится роль контролера выходных параметров, а также общей оценки всей системы в целом.

Таким образом, современная бумагоделательная машина осуществляет высокоорганизованные технологические процессы; она обладает способностью действовать с наивысшей производительностью, поскольку ее рабочие органы не имеют потерь времени на холостые хода.

Рассмотренные функциональные особенности бумагоделательных машин наложили определенный отпечаток на процесс развития их конструкций, которые в свою очередь влияли на усовершенствование самого технологического процесса. Поэтому, хотя человечество использует их всего около двух столетий, динамика развития этих технических систем находится на уровне таких видов техники, как самолеты или автомобили и другой сухопутный наземный транспорт.

Развитие параметров и конструкций бумагоделательных машин

Рассмотрим ретроспективное развитие технологического процесса производства бумаги из водоволокнистых суспензий. Как уже отмечалось, его сущность с момента изобретения (начало II в. н. э.) до настоящего времени не претерпела принципиальных изменений. При этом в течение более 17 столетий производство бумаги велось немашинным способом, интенсификация же технологических операций осуществлялась бумагоделательными машинами. Это обусловило парадоксальность современного технологического процесса с научной точки зрения. В самом деле, технологическая среда, в которой во взвешенном состоянии находятся растительные волокна и наполнитель — вода, обладает довольно неблагоприятными параметрами для осуществления главного процесса — разделения влаги и волокна. Высокие плотность и вязкость воды, а также примерно одинаковая плотность набухшего растительного волокна и воды приводят к тому, что скорость разделения их неограничена и трудно поддается форсированию после достижения некоторой величины. Трудности возникают главным образом по трем следующим причинам:

- 1) скорость процесса формования полотна, которое осуществляется осаждением волокон и наполнителей на сетку и фильтрацией сквозь них воды, имеет ограниченные пределы до того момента, когда начинает ухудшаться качество формования;

- 2) скорость обезвоживания уже сформованного полотна также ограничена высокой вязкостью компонентов; форсирование ее при определенных пределах приводит к разрушению пространственной структуры самого полотна;

- 3) высокая энергоемкость удаления влаги из бумажного полотна после прессовой части машины (сухость 41—43 %) обус-

ловлена тем, что на данном этапе обезвоживания приходится иметь дело с меж- и внутриволоконной влагой. Механическим путем отделить влагу практически невозможно, используется термический путь, который довольно инерционен и энергоемок.

Таким образом, три указанных фактора ограничивают по скорости производство бумаги водоволокнистым способом¹.

Отличительные особенности бумагоделательных машин предопределили развитие и усовершенствование их конструкций. Однако в отличие от многих машин и аппаратов, применяемых при изготовлении бумаги и картона и претерпевших значительные, а иногда и коренные изменения в процессе развития технологии целлюлозно-бумажного производства, бумагоделательные машины до наших дней в основном сохранили первоначальную принципиальную схему (рис. 20). История развития этих машин характеризуется непрерывным ростом их производительности, который составил примерно три порядка. Если на машине Робера можно было выработать 0,6 т бумаги в сутки, то производительность современных машин — 100—120 т в сутки (например, газетной бумаги).

Техническое достоинство машины Робера состояло в том, что принятый прежде дискретный процесс производства бумаги оказалось возможным заменить более

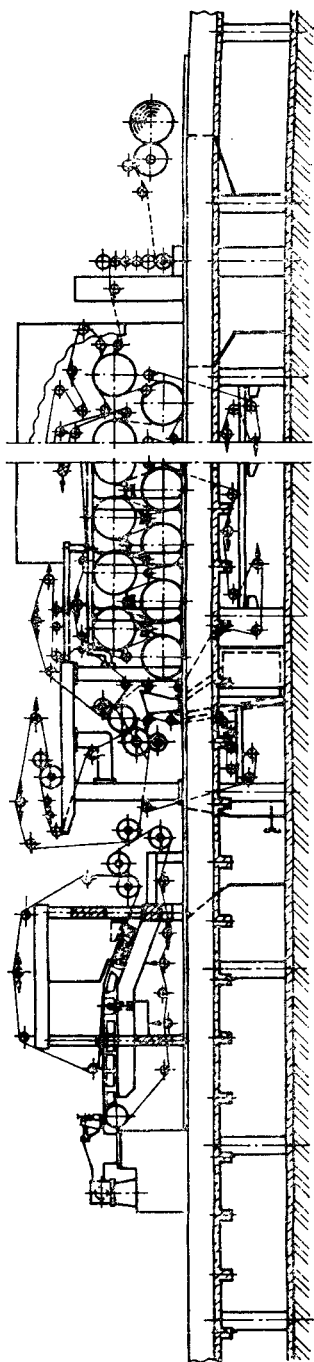


Рис. 20. Принципиальная схема современной бумагоделательной машины

¹ Развитие бумагоделательных машин оказало существенное влияние на совершенствование технологического процесса производства бумаги. Однако изучение причин и следствий его развития представляет собой отдельный вопрос и в настоящей работе не рассматривается.

совершенным — непрерывным, при котором бумага стала изготавливаться в виде бесконечного листа. Огромный скачок в повышении производительности был достигнут двумя путями: за счет увеличения скорости от 11 м/мин (1800 г.) до 900—1000 м/мин (в настоя-

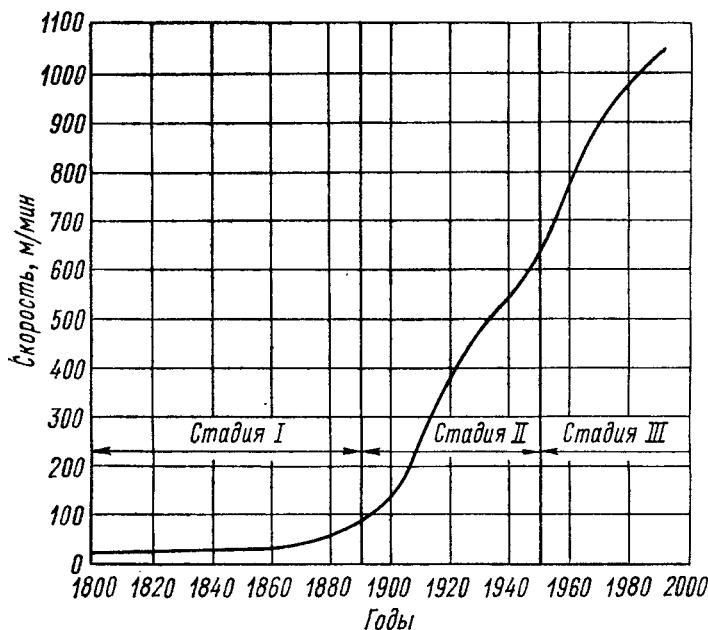


Рис. 21. Изменение скорости бумагоделательной машины (по данным автора)

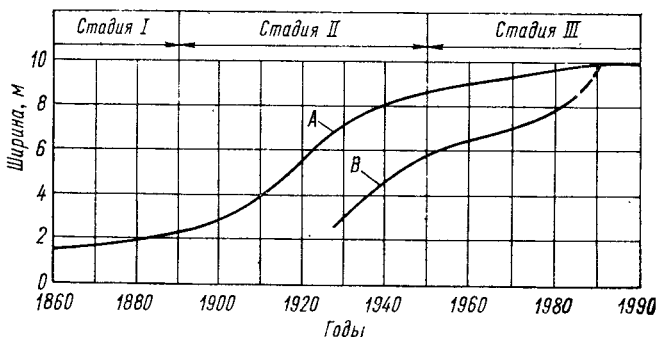


Рис. 22. Изменение ширины бумагоделательных машин
А — общемировые данные; В — по СССР

щее время) и увеличения ширины машины от 600 до 10 000 мм. Динамика изменения этих параметров за период с 1880 до 1980 гг. приведена на рис. 21, 22.

Анализ позволил установить важную закономерность, адекватную закономерности развития других видов техники. Она заклю-

чается в том, что интенсификация процессов, происходящих на бумагоделательных машинах, не только породила соответствующее усложнение конструкций и изменение их технических параметров и геометрических размеров, но и потребовала создания специальной системы мер по обеспечению их безотказности, ремонтпригодности и организации ремонтной службы, основанной на принципах глубокого разделения труда специалистов.

Наиболее важными показателями работы бумагоделательной машины являются скорость и ширина, как видно из соотношения 2.1. Эти параметры оказывают основное влияние на производительность, а значит, на надежность работы машин, а также на обеспечение выпуска продукции запланированного качества. Увеличение скорости и ширины машины при сохранении неизменного уровня эффективности ее использования требует осуществления специальных мер, поскольку приводит к возрастанию габаритных размеров, массы, к интенсификации износа трущихся частей, к технологическим трудностям при достижении необходимой точности изготовления машин. При этом значительно усложняются также ремонт и обслуживание.

Из двух параметров, влияющих на производительность, более существенным является скорость как фактор, приводящий к форсированию технологии производства, интенсификации процесса трения и износа, к быстрому исчерпыванию запасов работоспособности конструкций. Кроме того, скорость оказывает существенное влияние на качество вырабатываемой продукции, как правило, неблагоприятное.

Рост скорости практически определил направление развития конструкции как отдельных сборочных единиц частей, так и бумагоделательной машины в целом.

Скорость, естественно, связана с усовершенствованием технологии целлюлозно-бумажного производства. Рост ее, как правило, снижает качественные показатели вырабатываемого полотна бумаги и неизбежно влечет за собой изменение конструкций машин. Специально проведенные исследования причин и следствий, сопутствующих изменению скорости и ширины бумажного полотна машин для производства газетной бумаги (эти машины эксплуатируются с наибольшими скоростями), а также анализ ряда работ [20, 50] позволили установить, что изменение скорости и изменение ширины бумагоделательных машин имеют общие тенденции (рис. 21, 22): постоянный (непрерывный) рост на протяжении всей истории развития; медленный рост до 1900 г. и интенсивный — после 1900 г. с замедлением в настоящее время. Явно выраженная S-образность кривой рис. 22 наводит на мысль, что в целом процесс роста ширины бумагоделательных машин может быть описан уравнением Гомпсрца или Перла. Качественный же анализ конструкций показывает, что интенсификация роста кривых после 1900 г. обусловлена достижениями металлургической промышленности, вызвавшими появление новых высокопрочных мате-

риалов, таких как конструкционные стали, цветные сплавы бронзы, латуни, которые благодаря своим высоким физическим и химическим характеристикам позволили создавать конструкции, гарантирующие два важных требования:

1) стойкость в кислотной и щелочной средах рабочих органов машин при $pH = 2 \div 8$;

2) необходимую поперечную жесткость двухопорных конструкций, подавляющее большинство которых независимо от функционального назначения (рабочие органы или несущие конструкции) — тела вращения. Как правило, они выполняют и совмещенные функции.

После 1940 г. темпы роста ширины машин замедляются, несмотря на то что достижения металлургической промышленности начиная с этого периода наиболее результативны. Объяснить это обстоятельство можно с помощью анализа причин и следствий изменения скорости и других параметров бумагоделательных машин. Рост скорости потребовал значительного увеличения поперечного нагружения всех конструкций машины, что отрицательно сказалось на обеспечении необходимой поперечной жесткости; она как регрессивный фактор замедлила темпы роста ширины машины вплоть до наших дней.

Анализировать причины и следствия изменения параметра ширины машин нельзя в отрыве от исследования скорости, поскольку они взаимосвязаны не только как компоненты, входящие в выражение (2.1), но и чисто техническими причинами. При этом, как уже говорилось, рост ширины как фактор является менее активным по сравнению с ростом скорости с точки зрения нагружения деталей и узлов машины: при росте ширины увеличиваются лишь статические нагрузки, рост же скорости вызывает соответствующее увеличение динамических нагрузок в конструкциях. Основным следствием является то, что для обеспечения необходимой эффективности приходится применять самые последние достижения науки и техники при конструировании, изготовлении и эксплуатации.

Опустим изложение узкоспециального анализа взаимного влияния параметров скорости и ширины, выявленного при изучении многочисленных конструкций бумагоделательных машин. Приведем лишь общие выводы.

Неравномерное изменение параметров скорости и ширины бумагоделательных машин, и особенно волнообразный вид кривой (см. рис. 21), позволили установить важный признак их развития — многостадийность. Изменение скорости, например, обусловило три стадии в развитии конструкций бумагоделательных машин:

1-я — становление машины как линии непрерывного действия (рост скорости до 75—100 м/мин), 1800—1890 гг.;

2-я — совершенствование машины как линии автоматического действия (рост скорости 600—650 м/мин), 1890—1950 гг.;

3-я — превращение машины в систему с автоматическим управ-

лением технологическим процессом (рост скорости свыше 800 м/мин), после 1950 г.

Проанализируем кратко основные изменения технических параметров и конструкций бумагоделательных машин в соответствии с выделенными стадиями развития.

Стадия становления бумагоделательных машин в механизированную линию непрерывного действия. Выше говорилось, что бумагоделательные машины были изобретены в период, когда наметился рост машинного производства. Первоначальный этап их существования, как и других машин того времени, характеризуется малой интенсивностью технологических процессов, низкими динамическими нагрузками в механизмах. Это создавало благо-

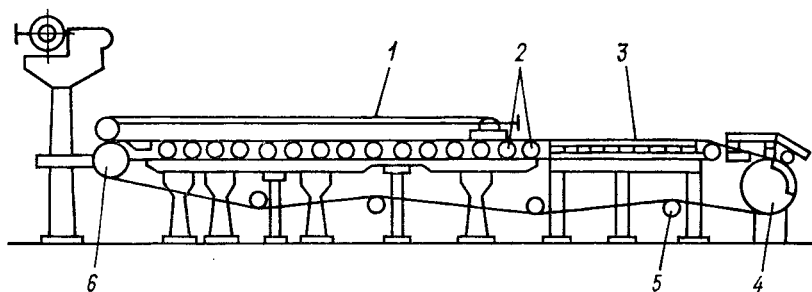


Рис. 23. Схема разборной конструкции сеточного стола бумагоделательной машины

1 — декельные ремни; 2 — регистровые валы (им предшествовали конструкции неподвижных планок из дерева); 3 — отсасывающие ящики; 4 — гауч-вал; 5 — сетководущий вал; 6 — грудной вал

приятные условия для работы трущихся сопряжений, поскольку удельные нагрузки были невелики, скорости скольжения обеспечивались необходимой смазкой без значительного износа трущихся поверхностей и т. д. Применявшиеся для изготовления машин металлы и другие материалы (древесина, малоуглеродистые стали, чугун, медь) и методы их механической обработки обеспечивали достаточную долговечность и безотказность конструкций. Хотя по современным представлениям эти материалы не обладали высокими эксплуатационными свойствами, они вполне удовлетворяли требованиям безотказной работы машин. Малые скорости гарантировали медленный износ сеток, поверхность которых скользила по обезвоживающим элементам, а большая продолжительность процессов обезвоживания на сеточном столе (рис. 23) не требовала использования высокого вакуума. Значит, при этом не возникало сил трения, приводящих к быстрому износу. Низкие скорости, массивные детали из чугуна, небольшие расстояния между опорами поперечных конструкций позволяли обеспечить необходимую жесткость. В целом не возникало ситуации, приводящей к вибрациям и повышенному износу машины.

По этим же причинам прессовая часть машины была надежной в эксплуатации, поскольку в ней применялись обычные двухвальные прессы несложной конструкции со сплошными валами (рис. 24). Хорошо подготовленная и размолотая в роллах суспензия обеспечивала необходимые качественные показатели бумажного полотна, а невысокие механические нагрузки при его обработке на прессо-

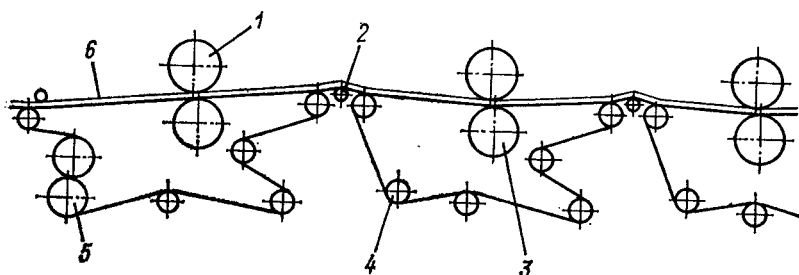


Рис. 24. Схема прессовой части бумагоделательной машины в первой стадии развития

1 — гранитный вал; 2 — бумаговедущий валик; 3 — нижний прессовый вал; 4 — сукноведущий вал; 5 — пресс для отжима сукна; 6 — полотно бумаги

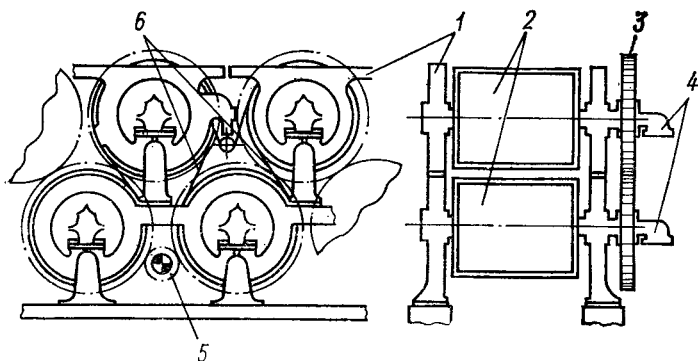


Рис. 25. Конструкция сушильной части бумагоделательной машины в первой стадии развития (фрагмент)

1 — станины; 2 — сушильные цилиндры; 3 — шестерни паразитного привода; 4 — паровпускные головки; 5 — приводная шестерня; 6 — полотно бумаги

вых частях создавали возможность устойчивой работы без обрывов полотна между прессами. Простота конструкции прессов гарантировала оператору хороший обзор за состоянием полуфабриката при его обработке на последовательно расположенных прессах и транспортировке между операциями. Низкая скорость движения полотна позволяла человеку, обслуживавшему прессовую часть, вмешиваться практически в любые процессы, поскольку физическое быстрдействие реакции человека превышало быстротечность происходящих процессов.

Открытые конструкции сушильной части машины имели естественную вентиляцию, т. е. свободное испарение влаги с поверхности сушильных цилиндров (рис. 25). Сушильные цилиндры обогревались паром с низким избыточным давлением.

После сушки бумажного полотна его уплотнение и поверхностная отделка осуществлялись на каландрах, в конструкции которых применялись полнотелые чугунные валы. Несложным был процесс намотки готового полотна бумаги, поскольку скорость его не превышала 100 м/мин. Открытые конструкции рабочих органов машины, несущих элементов и станин давали возможность обслуживающему персоналу визуально получать нужную информацию практически по всему ходу полуфабриката вплоть до получения готового продукта.

В первой стадии развития конструкция бумагоделательных машин была универсальной, позволяющей вырабатывать широкий ассортимент изделий различного качества на одной и той же машине в зависимости от композиции подаваемой суспензии.

Первый этап усовершенствования конструкций проходил в течение 80—100 лет и сопровождался постоянным ростом скорости. Однако низкие пределы технических параметров материалов, которые использовались для изготовления машин, приводили к усложнению конструкции отдельных частей и элементов машины, а иногда и к потере работоспособности некоторых узлов. Например, переход к скорости 80 м/мин невозможен был без создания новой конструкции напускного устройства — открытого напорного ящика с гидростатическим напором, позволившим повысить скорость и качество истечения суспензии из выпускной щели (рис. 26). После этого конструкции других частей машин также позволили повысить ее скорость.

Вместе с тем увеличившийся износ сетки при трении о неподвижные элементы сеточного стола вызвал необходимость замены деревянных планок на регистровые валы, которые имели достаточно высокий эффект обезвоживания в сбегавшем клине за счет провала воды под действием образующегося вакуума. В то же время повышение скорости потребовало удлинения рабочей части сетки и соответственно увеличения длины самого сеточного стола,

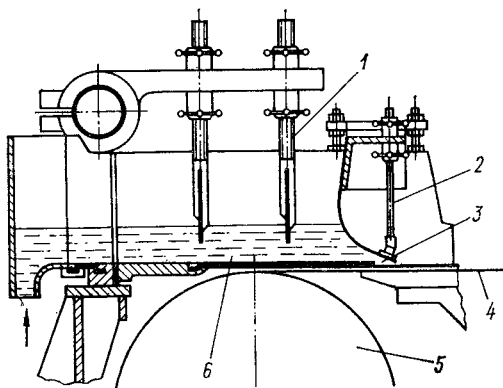


Рис. 26. Конструкция напорного ящика открытого типа

1 — перегородки для перемешивания суспензии; 2 — механизм регулировки выпускной щели; 3 — выпускная щель напорного ящика; 4 — сетка; 5 — грудной вал; 6 — суспензия

поскольку сократилось время пребывания на нем полотна и достаточное обезвоживание уже не обеспечивалось. Удлинение сеточного стола и самой сетки уменьшило износ сетки из-за снижения ее оборачиваемости.

На этой стадии развития все валы бумагоделательной машины еще оставались на подшипниках скольжения, которые сначала смазывались водой, а в дальнейшем консистентной смазкой. Ремонт, как правило, осуществлялся без снятия или демонтажа крупных узлов, с прекращением работы машины на весь период проведения ремонтных работ, независимо от их масштаба и вида, по мере возникновения неисправностей.

Последовательная доработка элементов конструкции машин обеспечивала дальнейший рост их скорости, хотя и медленный в конце первой стадии развития. Бумагоделательные машины имели уже высокую производительность, а возможности самой конструкции позволили осуществить дальнейшее повышение скорости.

Когда скорость машин подошла к 100 м/мин и превысила этот рубеж, это повлекло за собой дальнейшее усложнение конструкций. Кроме того, возникли трудности, связанные с обеспечением безотказности и ремонтпригодности во избежание потерь продукции из-за внезапных выходов из строя отдельных механизмов и неудобства их ремонта. Эти проблемы стали ощутимыми не только по причине повышения трудоемкости ремонта из-за усложнения конструкций, но и из-за потерь продукции в связи с остановом машин на период ремонта.

Как уже отмечалось, машина Робера не имела в своем составе всех частей бумагоделательной машины, сформировавшейся в конце первой стадии, поэтому первоначальный период развития машин можно считать периодом становления. Примерно в 1830 г. все части машины были соединены в производственную линию непрерывного действия, что ознаменовалось механизацией процесса производства бумаги. Это привело к резкому сокращению числа рабочих, занятых на ее обслуживании; функции их ограничили процессом управления и наблюдением за постоянством количества и качества производимого продукта. Регулирование механизмов при пуске остановленных машин и подналадка их во время работы еще оставались ручными, что сдерживало дальнейший рост скорости.

Переход от мануфактурного способа производства к промышленному в различных отраслях народного хозяйства европейских стран увеличил потребности в объеме потребления бумаги. Однако техническое оснащение поточных линий не соответствовало этой потребности, и рост объема производства бумаги обеспечивался лишь за счет увеличения числа бумажных фабрик.

В конце XIX в. возможности машин первой стадии развития на бумажных фабриках достигли предела, и возникла необходимость значительного усовершенствования их конструкций.

Итак, к 1890—1910 гг. заканчивается формирование первого поколения конструкций бумагоделательных машин и завершается

первая стадия их развития как средств производства бумаги. В целом первую стадию развития бумагоделательных машин характеризуют следующие особенности:

- создание поточной механизированной линии непрерывного действия из различных механизмов и агрегатов;

- широкий ассортимент продукции, вырабатываемой на одной машине;

- малая интенсивность протекающих процессов;

- простота конструкций и высокая их надежность;

- низкие удельные параметры (съем воды с 1 м² сеточного стола, количество вырабатываемой бумаги на 1 м ширины сетки, объем испарения влаги с 1 м² сушильного цилиндра и т. д.);

- медленное повышение скорости и производительности, которые обеспечивались преимущественно за счет пропорционального увеличения количества элементов для обезвоживания и сушки, т. е. экстенсивным путем;

- ручное управление машиной;

- осуществление ремонтных работ по потребности, непосредственно на машине, с остановом ее на весь период ремонта.

Накопленный опыт создания и эксплуатации бумагоделательных машин примерно за один век их существования, развитие других видов техники и отраслей производства, создавших необходимые материалы и методы их обработки, а также расширившиеся возможности машиностроения создали предпосылки для качественного скачка в развитии бумагоделательных машин. Таким образом, первое их поколение, механизировав процесс производства бумаги, освободило человека от ручного труда, оставив за ним операции управления и контроля за процессом производства бумаги.

Стадия совершенствования бумагоделательной машины как линии автоматического действия. Превратившись в единую технологическую линию непрерывного действия, бумагоделательная машина не только механизировала процесс производства бумаги, но и создала предпосылки для интенсификации дальнейшего роста производительности. Это достигалось прямым ускорением процессов напуска, формования, прессования, сушки полотна, т. е. процессов обезвоживания, а также механической обработки давлением и намотки в рулоны. Непрерывность производства и двухопорная конструкция рабочих органов бумагоделательных машин в виде тел вращения исключали потери времени на холостые движения. Однако созданные предпосылки для увеличения скорости работы машин потребовали для их привода поисков новых силовых установок с параметрами, которые удовлетворяли бы условиям возрастающей мощности и синхронности линейных скоростей вращающихся рабочих органов машины. Так, водяное колесо, являвшееся источником энергии механического привода в первой стадии развития бумагоделательных машин, в конце ее было заменено паровой машиной, а в дальнейшем системой электрических двигателей.

Усовершенствование конструкций машин было бы невозможно

без соответствующих успехов в технике и технологии подготовки суспензии, когда дискретный процесс был заменен непрерывным с использованием нового вида сырья, более дешевого и имевшегося в достаточном количестве — древесины. Так, еще в 1856 г. Кингслендом (Канада) была разработана дисковая мельница, а в 1858 г. И. Жорданом и К. Евстицем (Франция) — коническая, которые постепенно (правда, через длительные время) вытеснили роллы. Обладавшие значительно большей производительностью, дисковые и конические мельницы вместе

с появившимся очистным агрегатом заняли главенствующее положение в системе подготовки суспензии перед подачей ее на бумагоделательную машину.

Для дальнейшего повышения скорости (100 м/мин и выше) и обеспечения надежной работы машин, а также управления ими оказалось необходимым заменить громоздкие механические передачи трансмиссионного типа многодвигательным электрическим приводом (1907 г.) [36]. В это же время были применены первые элементы автоматического управления приводом бумагоделательной машины. Примерно в тот же период были разработаны и внедрены автоматические устройства для управления движением и натяжением сеток и сукон в сеточной, прессовой и сушильной частях. Созданы были приспособления для заправки бумаги (воздушное в сеточной и прессовых частях и канатиковое в сушильной), заменившее ручные операции. Эти новшества, продержавшиеся примерно до 1913 г., позволили значительно

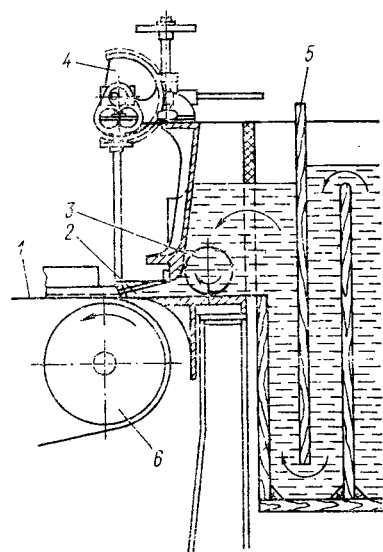


Рис. 27. Конструкция напорного ящика открытого типа в начале стадии развития бумагоделательных машин

1 — сетка; 2 — выпускная щель; 3 — перфорированный валик; 4 — механизм регулировки выпускной щели; 5 — перегородки для перемешивания суспензии; 6 — грудной вал

поднять скорости машин. Кроме того, применение новых материалов (бронзы вместо меди; легированной стали; резины вместо дерева; цветных антифрикционных сплавов и т. д.) способствовало дальнейшему усовершенствованию конструкций.

Увеличение скорости движения сетки потребовало соответственного повышения скорости течения суспензии из напускного устройства, что отразилось на изменении конструкций напорных ящиков (рис. 27). Основной принцип подачи суспензии под гидростатическим давлением, создаваемым столбом жидкости в напорном ящике, к концу второй стадии стал неприемлем. Для скоростей свыше 500 м/мин, которые уже были освоены на машинах в этот

период, гидростатический столб жидкости должен был быть более 5 м, что привело бы к непреодолимым технологическим трудностям. Обеспечить постоянное диспергирование волокон путем перемешивания при возрастающих параметрах гидростатического столба оказалось чрезвычайно трудным. Наступало флоккулирование суспензии, и качество бумаги ухудшалось, да и сами размеры напорного ящика получались большими, ящики были неудобны в эксплуатации. Особенно усложнялись регулирование уровня,

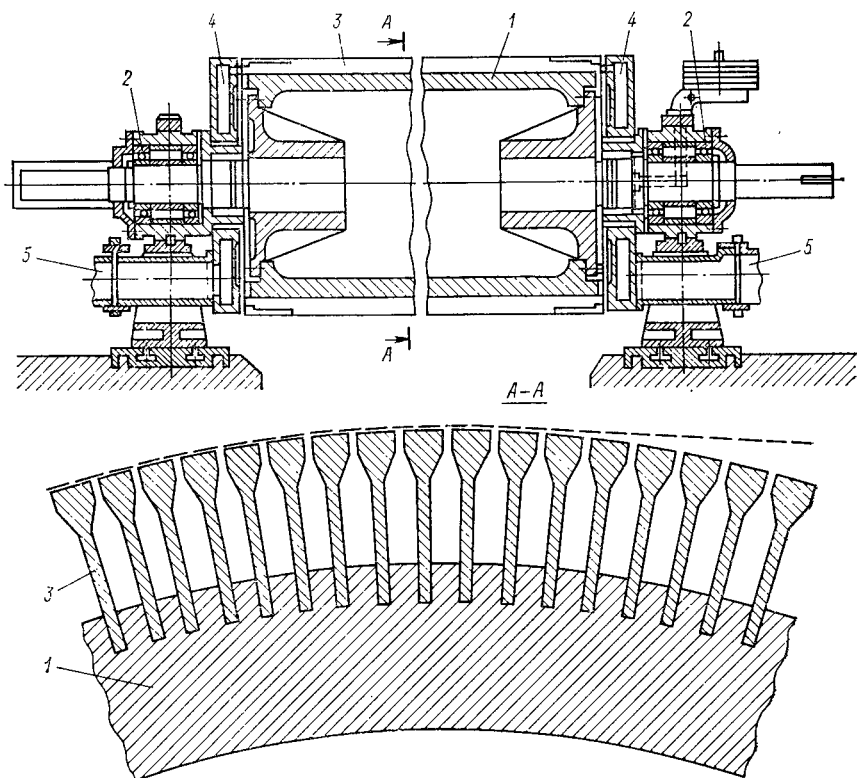


Рис. 28. Схема отсасывающего гауч-вала

1 — чугунный пустотелый цилиндр; 2 — подшипники вала; 3 — бронзовые колосники; 4 — отсасывающая головка; 5 — отводящий патрубок

профилактические осмотры и очистка внутренней поверхности, соприкасающейся с суспензией.

Применявшиеся ранее гауч-прессы в конце сеточной части также имели большие недостатки. Маншоны верхнего ряда быстро закатывались, засорялись и задирали сформованное полотно, нарушая его непрерывность, что вызывало частые обрывы. Кроме того, маншоны быстро выходили из строя, так как их износ сопряжен с изменением водопроницаемости, что определяло непостоянство сухости бумажного полотна. Вместе с тем механический способ принудительного удаления воды из структуры сформован-

ного полотна оставался единственным возможным решением. Поиски конструкторов привели к изобретению отсасывающих валов (1908 г.), которые были установлены в конце сеточной части вместо гауч-пресса и позволили увеличить количество удаляемой воды, повысить прочность полотна, сократить его обрывность и соответственно обеспечить более высокие скорости работы машины (рис. 28). Однако отсасывающий вал по технологическим причинам не мог повсеместно вытеснить гауч-прессы в конструкции машин, производящих цветную бумагу. Это обусловлено тем, что при работе отсасывающие гауч-валы обеспечивают только односторонний отсос воды из полотна, что приводило к порче продукции: вследствие выноса красителя с одной стороны полотна бумага получалась разной цветовой тональности. В дальнейшем потребовалось значительное усовершенствование технологии производства этих видов бумаги, чтобы обеспечить ее качественные показатели при работе с отсасывающими гауч-валами.

Повышение скорости до 500 м/мин и связанный с этим рост динамических нагрузок привели к усложнению металлических конструкций станин и валов, к увеличению их габаритных размеров для обеспечения соответствующей поперечной жесткости несущих конструкций и рабочих элементов сеточного стола. Соответственно увеличилась масса деталей и сборочных единиц, которые в прежних конструкциях разбирались для того, чтобы можно было надеть сетку при замене ее. В этих условиях на смену разборной конструкции сеточного стола с подшипниками скольжения пришли столы выдвижного и консольного типов с валами, установленными на подшипниках качения, что при росте габаритных размеров значительно повысило надежность работы и упростило обслуживание (рис. 29).

Усложнение конструкции сеточного стола потребовало соответствующих мер по поддержанию его безотказной работы между плановыми остановами машины, которые из-за длительности ремонтно-профилактических работ и связанных с этим больших потерь продукции старались делать как можно реже. Потребовались мероприятия ремонтно-профилактического характера. В этот период зародились первые механические приспособления для поднятия тяжелых конструкций при эксплуатации сеточных столов и бумагоделательных машин в целом.

В течение второй стадии развития машины на сеточном столе постоянно совершенствовались сначала ручные, а потом и автоматические системы регулирования параметров технологического процесса формования и обезвоживания полотна. Повышение скорости и рост удельных показателей работы сеточного стола в конце второй стадии достигались уже не за счет увеличения его длины, т. е. простым набором последовательно расположенных обезвоживающих элементов, а путем интенсификации технологических операций и повышения их энергоемкости.

С ростом скорости постепенно возникали и проблемы надежности конструкций, поскольку интенсификация всех процессов,

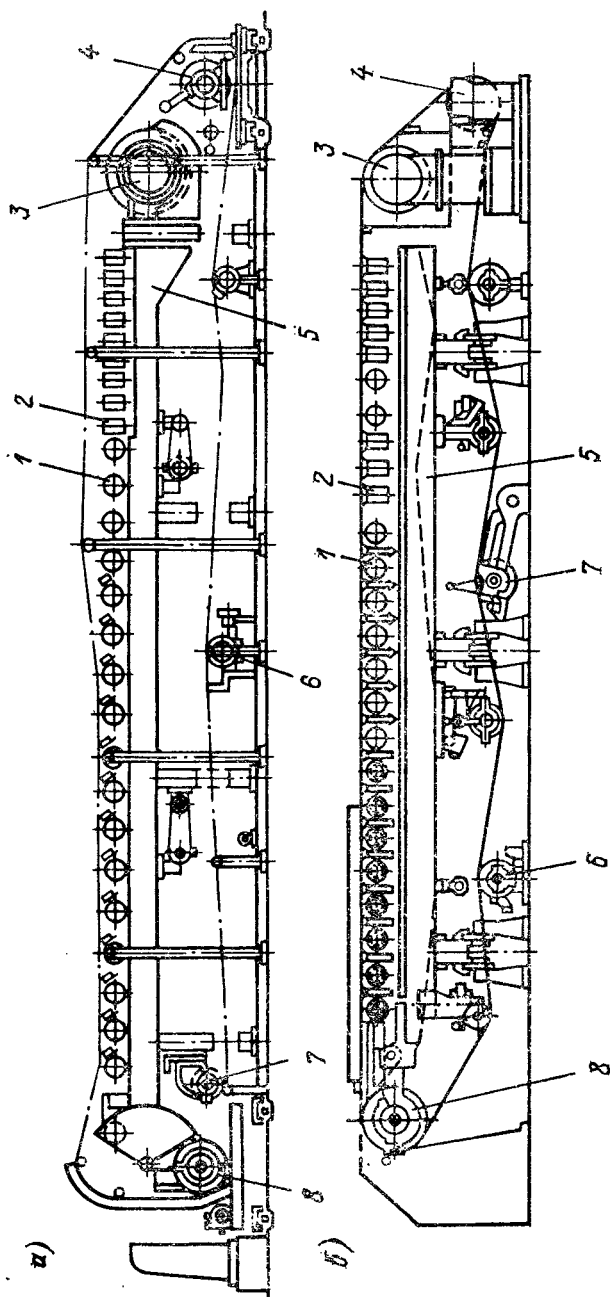


Рис. 29. Схема консольного и выдвижного сеточных столов: а — сточный стол консольного типа (показано положение при надавании сетки); б — сеточный стол выдвижного типа с сеткой в рабочем положении
 1 — регистрирующий валик; 2 — отсасывающий ящик; 3 — гауч-вал; 4 — сеткоповоротный вал; 5 — продольные балки; 6 — сеткоправка; 7 — сетко-натяжка; 8 — грудной вал

протекающих на машине в течение второй стадии, была довольно значительной. Необходимо отметить, что второй стадии развития бумагоделательных машин соответствует тщательная и постоянная отработка и усовершенствование конструкций отдельных частей и элементов. Особенно это касается рабочих органов, таких как обезвоживающие элементы, сетки, устройства для правки и натяжки сетки и т. д.

На этой стадии впервые в конструкции машины появляется такой метод решения задач надежности, как резервирование. Например, автоматическая правка и натяжка сеток и сукон дублируется в конструкциях, несмотря на то что каждая из них вполне обеспечивает управление ими. Тем не менее большие экономические потери, вызванные простоями машин при отказах подобного рода составных частей, обусловили необходимость дублировать их и обеспечивать таким образом непрерывность работы машин между запланированными остановами.

В целом же сеточный стол бумагоделательной машины на этой стадии развития, сохранив свои принципиальные функции, имел усовершенствованную конструкцию всех элементов, с полной механизацией технологического процесса и автоматическим регулированием отдельных технологических операций.

Значительные конструктивные усовершенствования претерпела и прессовая часть бумагоделательных машин во второй стадии развития. Несмотря на то что количество прессов на машинах практически не изменилось и составляло не больше 3—5, их конструкции подверглись существенным изменениям. Обычный пресс с полнотелыми валами на подшипниках скольжения уже не мог обеспечить на скорости 200 м/мин и выше надежного получения необходимой сухости и прочности полотна. Эта проблема была решена путем создания прессов с нижним отсасывающим валом на подшипниках качения, с применением вакуумных систем для интенсификации отвода отжимаемой воды. Все это привело к созданию несравненно более сложной конструкции прессов, что видно из рис. 30. Потребовалось применение новых материалов — сначала бронзы для рубашек отсасывающих валов, а затем и нержавеющей стали, обладающей гораздо более высокой прочностью и адгезионными свойствами, которые обеспечивали необходимую прочность сцепления рубашки с перфорированным резиновым покрытием. Технологические соображения, в основном связанные с повышением качества полотна, потребовали замены чугунных верхних валов на гранитные, а позднее — на стонитовые для некоторых видов продукции. Все это позволило поднять скорости машин до 500—600 м/мин при одновременном повышении линейного давления между валами до 408—612 Н (40—60 кг) на 1 см длины.

Несмотря на неизменность количества прессов, схема проводки полотна по прессовой части машин во второй стадии развития также претерпела существенные изменения (рис. 31). В основном это касалось постепенного уменьшения суммарной длины свободных участков полотна. Все большие участки бумаги между прессовыми

валами поддерживаются сукнами, постепенно уменьшаются свободные участки, вплоть до полной их ликвидации, что знаменует по существу уже образование следующего поколения конструкций машин, т. е. третьей стадии их развития.

Сушильная часть бумагоделательной машины практически не претерпела принципиальных изменений, несмотря на то что контактный способ сушки бумаги нельзя назвать самым производительным из-за инерционности процесса подвода тепла к полотну бумаги и испарения влаги. Эта консервативность обусловлена прежде всего технологическими трудностями качест-

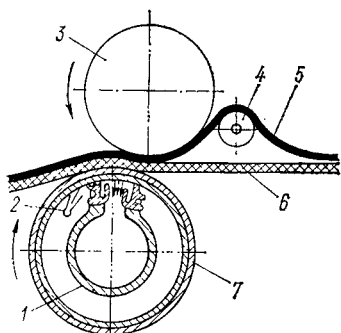


Рис. 30. Схема отсасывающего пресса (фрагмент)

1 — неподвижная вакуумная камера с уплотнениями; 2 — водяной спрыск в зону уплотнений отсасывающей камеры; 3 — верхний прессовый вал; 4 — бумаговедущий валик; 5 — полотно бумаги; 6 — прессовое сукно; 7 — рубашка

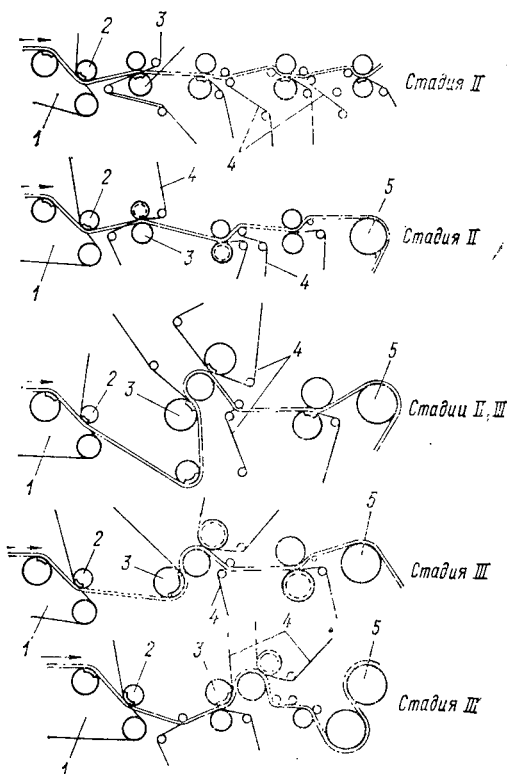


Рис. 31. Усовершенствование схемы проводки полотна в прессовых частях бумагоделательных машин второй и третьей стадий развития

1 — сеточный стол; 2 — пересасывающий вал; 3 — пресс отсасывающий; 4 — сукна; 5 — сушильный цилиндр

венной сушки бумаги другими способами, потому что интенсивный подвод тепла приводил к ороговению волокна, особенно на поверхности бумаги, и значительно ухудшал ее качество. Поэтому число цилиндров во втором поколении бумагоделательных машин постепенно увеличивалось почти прямо пропорционально росту скорости, обуславливая экстенсивность решения этих задач. Поскольку не было найдено принципиально новых и эффективных способов интенсификации технологии обезвоживания в сушильной части ма-

шин, конструкция сушильной части явилась предметом наиболее тщательных разработок, чтобы она отвечала темпам роста осваиваемых скоростей бумагоделательных машин в целом.

Первым препятствием в повышении скорости машины сверх 150—200 м/мин стал применявшийся первоначально открытый шахматный привод сушильных цилиндров (рис. 32, а). Он оказался

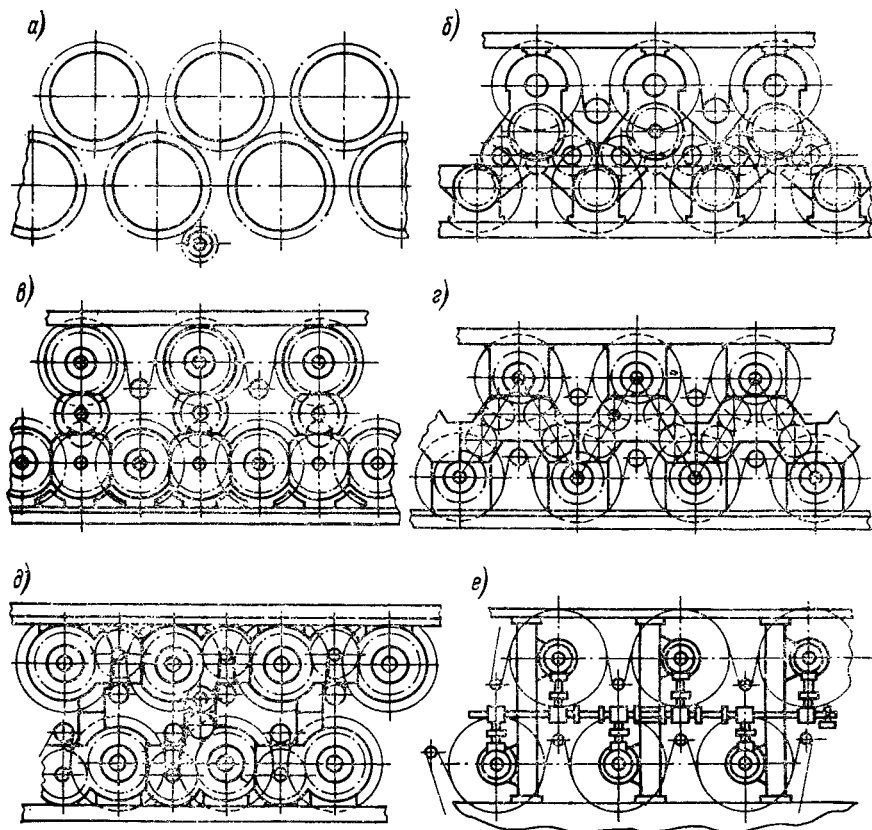


Рис. 32. Схема развития паразитного привода сушильных частей бумагоделательных машин: а — шахматный открытый привод; б — привод с диагональными промежуточными шестернями; в — привод с вертикальной передачей вращения; г — привод с двумя промежуточными шестернями; д — привод с горизонтальной передачей вращения; е — привод с автономными коническими редукторами

ненадежным из-за условий работы зубчатых зацеплений. Высокие температура и скорости вращения зубчатых колес не позволяли обеспечить надлежащую смазку поверхностей зацепления, что приводило к большому износу рабочих шестерен и шуму. Кроме того, конструкция была громоздкой и на таких скоростях небезопасной в эксплуатации. Поэтому она была заменена закрытым приводом

с централизованной циркуляционной смазкой и различными схемами исполнения, применяемыми до настоящего времени (рис. 32, б). Как и в сечочной и прессовой частях, подшипники скольжения цилиндров и трубчатых валов уступили место подшипникам качения, надежно работающим на высоких скоростях. Смазка их впервые в конструкциях бумагоделательных машин стала осуществляться централизованно с оборудованием специальных насосных станций, которые обеспечивали не только подачу и регулирование расхода масла, но и поддержание постоянной его температуры и очистки от продуктов износа зубчатых зацеплений.

Для уменьшения износа от вибрации, которая неизбежно появлялась с ростом скорости, и повышения надежности потребовались высокая точность изготовления и динамическая балансировка сушильных цилиндров и трубчатых валов, а также механическая обработка внутренних поверхностей цилиндрических корпусов.

Интенсивный подвод тепла к сушильной части обусловил появление новых конструкций, связанных с повышением использования тепла. Из этих соображений были разработаны устройства вытяжных колпаков над сушильными частями для рекуперации и утилизации тепла и испаряемой влаги и одновременно для вентиляции межцилиндровых пространств, что привело к еще большему усложнению конструкций сушильных частей. Рост скорости, энергонасыщенность, а также условия обслуживания сушильных частей, работающих при высокой температуре, обуславливали высокую степень автоматизации пароснабжения, отвода конденсата, централизованной смазки, эвакуации паровоздушной смеси, вентиляции, заправки полотна, управления движением и конденционированием сукуна и т. д.

На этой стадии развития бумагоделательных машин в сушильной части зародилась система эвакуации брака при обрывах бумаги. В противном случае скапливание в межцилиндровой сушильной части бумаги при обрывах приводило ко многим осложнениям, вплоть до разрушения конструкции сушильных частей.

Итак, сушильной части бумагоделательной машины присущи те же особенности развития, что и сечочной и прессовой частям, а именно: неизменность принципиальной схемы, усовершенствование и усложнение конструкций для обеспечения надежного функционирования при повышенных скоростях работы. Отличительным свойством сушильной части на этой стадии развития следует считать, с одной стороны, консервативность и инерционность, с другой — тщательную автоматизацию технологических операций, поскольку высокая температура рабочих органов (свыше 100 °C) приводила к тяжелым условиям их обслуживания.

Обработка полотна бумаги после сушильной части осуществляется на каландрах; метод обработки остается принципиально неизменным вплоть до наших дней. Однако конструкция каландров претерпела большие изменения. Неудобные в обслуживании при больших скоростях закрытые станины, охватывающие подшипни-

ковые узлы валов, уступили место открытым. Неудобный в эксплуатации грузовой прижим каландровых валов вытеснен пневматическим прижимным устройством. Для управления линейным давлением в захватах каландровых валов стали применять специальные механизмы, по необходимости уменьшающие или увеличивающие этот параметр во время работы каландра. Автоматизирована была система заправки полотна бумаги и подъема валов при обрывах. Для более точной регулировки процесса уплотнения бумаги во время ее прохождения между валами каландра была применена система обогрева и охлаждения валов.

Во второй стадии развития бумагоделательной машины процесс отделки бумаги поставил перед конструкторами серьезные инженерные проблемы, связанные с надежностью и долговечностью каландровых валов, поскольку повышение скорости приводило к резкому увеличению износа их поверхности и снижению качества отделки бумаги. Для повышения твердости и износостойкости каландровых валов были разработаны новые химические составы для их отливки (чугун, легированный хромом, молибденом; высокопрочный чугун с шаровидным графитом; закаленные стальные валы и др.). Чтобы обеспечить равномерное линейное давление по всей рабочей части каландра, ранее применялись бомбированные валы, которые компенсировали их прогиб. Все это значительно усложняло конструкцию, изготовление и обслуживание каландров, и все же не обеспечивало их надежной работы. Ресурс каландров до перешлифовки валов при эксплуатации был одним из самых низких в бумагоделательной машине (исключая сукна и сетки) и не превышал 3—6 мес. Необходимо отметить, что эти вопросы оказались настолько трудноразрешимыми, что и в настоящее время представляют основную проблему при отделке бумаги.

Рост скорости во второй стадии развития выявил пределы использования фрикционных осевых накатов, которые всегда применялись для намотки полотна бумаги в рулоны. При скоростях более 200 м/мин они работали ненадежно из-за трудности обеспечения равномерных усилий при проскальзывании фрикционной муфты по мере изменения диаметра наматываемого рулона бумаги. Поэтому получить качественную намотку полотна на тамбурном валу было трудно.

На смену осевым пришла конструкция периферических накатов, которые обеспечивали удобство обслуживания при намотке большого рулона диаметром до 2,5 м. Их конструкция, постепенно совершенствуясь, надежно служит и до наших дней. Однако ряд вопросов усовершенствования механизмов поворота приемного рычага, перемещения прижимной каретки, системы управления всеми операциями автоматической заправки бумаги на тамбур потребовал значительных конструкторских работ. Вместе с тем эта часть бумагоделательных машин и в настоящее время не является лимитирующей при повышении скорости работы машины.

В структуру бумагоделательных машин входят не только рассмотренные выше основные части, но и системы, общие для всей

технологической линии. К ним относятся: системы привода, системы транспортировки и переработки брака, системы малой механизации при проведении работ и обслуживании и т. д. Анализ развития этих систем показывает, что им присущи те же закономерности, что и основным частям бумагоделательной машины. Например, этапы совершенствования привода бумагоделательной машины характерно отражают влияние на него скорости и мощности, связанных с ростом производительности бумагоделательной машины в целом. Так, исчерпавший свои возможности по точности канатный привод, применявшийся на первой стадии развития бумагоделательной машины, а позднее и плоскоременные передачи от паровых машин с промежуточными контрприводами и вариаторами с коническим шкивом уже при скорости выше 200 м/мин были заменены одним приводом — электрическим двигателем постоянного тока с продольным трансмиссионным валом. В отличие от ранее применявшихся конструкций приводов частоту вращения трансмиссионного вала можно было плавно регулировать. Поддержание точности соотношения скоростей отдельных секций к 50-м годам нашего столетия производилось с помощью дифференциалов. Такие приводы надежно работали при скорости 500—600, а в отдельных случаях 700—800 м/мин.

Характерным для систем привода бумагоделательных машин во второй стадии развития является то обстоятельство, что регулирование номинальной скорости производилось через главный приводной двигатель, а точность соотношения скоростей обеспечивалась, как правило, механическим путем при передаче мощности от общей системы к отдельным приводным секциям.

Увеличение скорости во второй стадии потребовало соответствующих мер по подготовке водной суспензии перед подачей ее в напорный ящик. По этой причине вспомогательное оборудование претерпело большие конструктивные изменения и значительно усложнилось, а требования к надежности работы постепенно повышались. Схематично эти изменения можно представить следующим образом:

- применение для очистки суспензии от твердых частиц иностранного происхождения оборудования сначала в виде песочницы, затем циклонного и, наконец, центробежного очистителей;

- применение для очистки от частиц растительного происхождения узлоловителей (плоских и цилиндрических) с бронзовым ситом;

- применение для создания вакуума оборудования в виде водокольцевых вакуумных насосов.

Пока скорость бумагоделательной машины находилась в пределах 150—200 м/мин, все операции — заправка полотна во время обрывов, уборка и транспортировка брака — производились по существу вручную. Повышение скоростей привело к необходимости механизации этих процессов, а также механизации управления ими. Например, при заправке бумаги с сеточной части на прессовую со скоростью 300—350 м/мин применялось устройство передачи

полотна бумаги с помощью струи воздуха. Подобного рода устройства использовались для заправки полотна и в прессовой части. Во избежание аварий стали оснащать машины системой механизмов для удаления брака при обрывах. В сушильной части ручную заправку полотна на цилиндре заменила автоматически действующая канатиковая. На каландре и пакате заправка осуществляется с помощью воздушного устройства.

Для обеспечения синхронной работы всех частей бумагоделательной машины, строгого соблюдения уборки брака, предотвращения аварийных ситуаций потребовалась разработка системы автоматического регулирования. Если до 1940 г. бумагоделательные машины почти не оснащались системами автоматизации,— достаточно было применения отдельных автоматов, регулирующих технологические операции,— то в дальнейшем за короткое время степень автоматизации достигла уровня передовых видов техники.

Таким образом, усложнение конструкций бумагоделательных машин привело к увеличению вероятности отказов, а рост их производительности — к возрастанию экономических потерь при вынужденных и плановых простоях. Эти факторы послужили основными причинами возникновения проблемы безотказности и ремонтнопригодности бумагоделательных машин [11, 29, 64].

Значительные изменения произошли в обслуживании и ремонте машин. В начале второй стадии развития их конструкции отличались низкой ремонтнопригодностью, причем ее повышение и не было обусловлено объективно. Длительное время ремонт производился непосредственно на машине с полным ее остановом и прекращением выпуска продукции. Во второй стадии развития такие потери времени стали экономически необоснованными и потребовали такого усовершенствования конструкций, чтобы они позволили выполнить быструю замену узлов без значительной разборки. Эти обстоятельства привели к необходимости проведения ремонта с демонтажем неисправных узлов. Так как затраты времени при ремонте на месте были велики и качественно выполнить его в этих условиях было трудно, стали создавать машинные приспособления для возможно быстрого отчленения и демонтажа ремонтируемых узлов. Кроме того, стали создаваться устройства, механизмирующие и сокращающие процесс монтажа, демонтажа и обслуживания.

Во второй стадии на бумагоделательных машинах стала применяться так называемая малая механизация: грузоподъемные механизмы, смонтированные на машине для снятия узла или для консольного вывешивания конструкций, приспособления для протаскивания сукон, для растяжки сеток и т. п. В самом конце второй стадии развития начали внедряться механизированные устройства для монтажа и демонтажа подшипников и шестерен (гидрогайки), а также другие приспособления, предназначенные специально для выверки монтируемых узлов. Все это привело к возникновению системы технического обслуживания и ремонта бумагоделательной машины. В дальнейшем она превратилась в специализированную систему с разделением труда по видам работ, связанных с обслу-

живанием и ремонтом электрической, механической систем и системы автоматизации.

Таким образом, в течение второй стадии развития все механические части бумагоделательной машины были полностью усовершенствованы, в ее структуру были введены функционально новые механизмы и устройства. Процесс управления машиной был оснащен устройствами механизации вспомогательных работ, приборами, регуляторами и автоматами, позволяющими вести дистанционное управление и создать систему автоматического регулирования.

Анализ развития конструкций бумагоделательных машин во второй стадии позволяет сделать вывод, что за этот период, охватывающий примерно 50 лет, произошло резкое повышение их единичной мощности. Машины превратились в быстродействующие автоматические линии (автоматические системы машин), работающие со скоростью до 600—650 м/мин.

В целом вторая стадия развития бумагоделательных машин характеризуется следующими особенностями:

- сохранением принципиальной схемы с некоторым ее усовершенствованием;
- резким повышением интенсивности процессов;
- значительным усложнением конструкций, увеличением массы, ростом габаритных размеров, повышением требований к обеспечению надежности;
- высокими темпами роста удельных параметров: удельной производительности, съема воды и бумаги с 1 м² сеточного стола, потребления энергии, удельной металлоемкости;
- повышением скорости и ширины за счет качественного изменения конструкций отдельных частей и машины в целом;
- созданием системы специализированного обслуживания и ремонта, характеризующейся разделением труда по видам работ.

Стадия превращения бумагоделательной машины в систему с автоматическим управлением технологическим процессом. Как уже говорилось, вторая стадия развития бумагоделательных машин характеризуется значительными усовершенствованиями конструкций, которые вбирали в себя новинки и достижения науки и техники. Это обусловило интенсификацию всех процессов, протекающих при производстве бумаги. Однако принципиальных изменений как схем машины, так и технологических процессов в этой стадии по существу не произошло. Поэтому бумагоделательные машины в первой и второй стадиях развития мало отличаются друг от друга: схемы их характеризуются наличием свободных участков полотна при передаче его с сеточной части в прессовую, между прессами, между сушильными цилиндрами и т. д. Это сказалось в замедлении темпов роста скорости в конце второй стадии, поскольку влекло за собой обрывы бумаги и являлось причиной неустойчивой работы машины. Поэтому в конце второй стадии как в конструктивном оформлении, так и в схемных решениях появились нововведения, которые позволили разрешить многие назревшие проблемы. Таким нововведением прежде всего явилась равно-

мерная подача водоволокнистой суспензии на сетку машины, механизация передачи бумажного полотна с сеточной части в прессовую, где наиболее трудноустраняемы обрывы из-за низкой прочности сформованного полотна, и, наконец, интенсификация сушки бумажного полотна в сушильной части машины.

Опыт разработки конструкций и эксплуатации машин второго поколения, а также прогресс в науке и технике создали объектив-

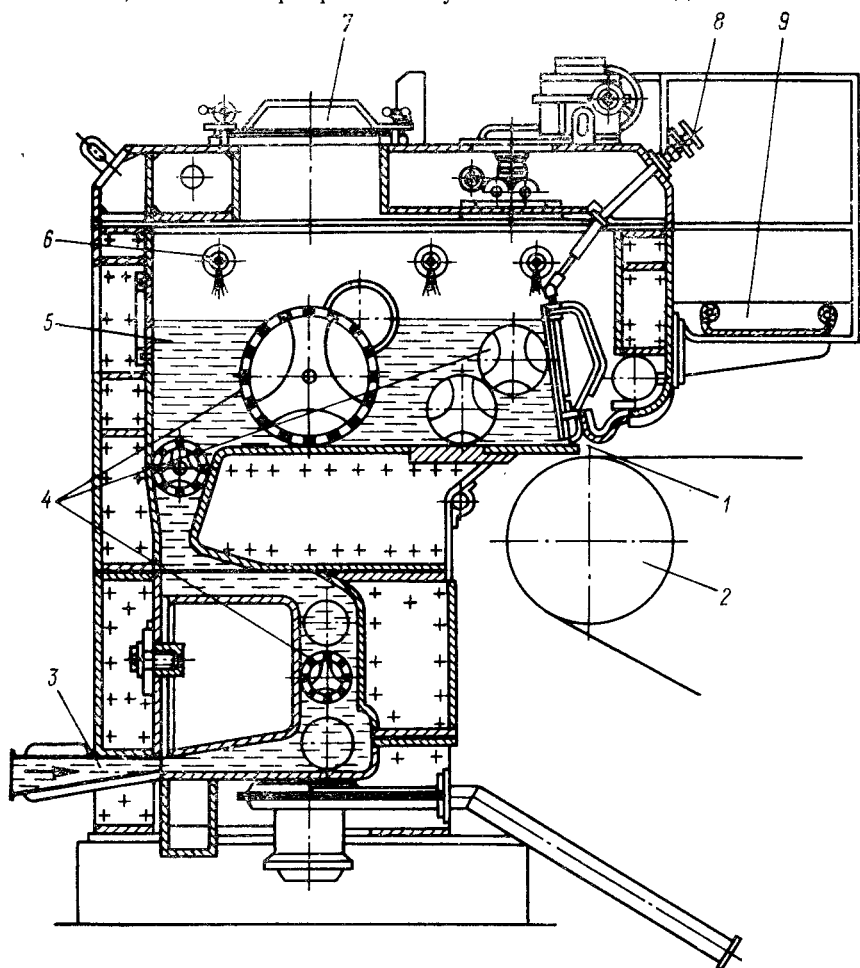


Рис. 33. Конструкция напорного ящика закрытого типа

1 — выпускная щель; 2 — грудной вал; 3 — впускной коллектор; 4 — перфорированные валы; 5 — суспензия; 6 — сырьевые пеногасители; 7 — смотровой люк; 8 — механизмы регулировки выпускной щели; 9 — мосты обслуживания

ные предпосылки для формирования нового поколения бумагоделательных машин, т. е. начала третьей стадии их развития.

Чтобы обеспечить производство качественного бумажного полотна при более высоких скоростях машин, потребовались прежде

всего новые конструкции напускных устройств, которые, с одной стороны, обеспечивали бы напуск хорошо диспергированной водоволокнистой суспензии с большой скоростью на сетку, а с другой стороны, не имели недостатков прежних конструкций, таких как громоздкость, сложность и недостаточная надежность. Длительные поиски конструктивных решений привели к созданию закрытых напорных ящиков с воздушной подушкой (рис. 33), в которых суммарный напор воздушного давления и гидростатического столба жидкости обеспечивал необходимую скорость истечения суспензии. Эта громоздкая и ненадежная в эксплуатации конструкция не могла обеспечить нужный рост скорости бумагоделательных машин, хотя на первых порах и отвечала предъявляемым требова-

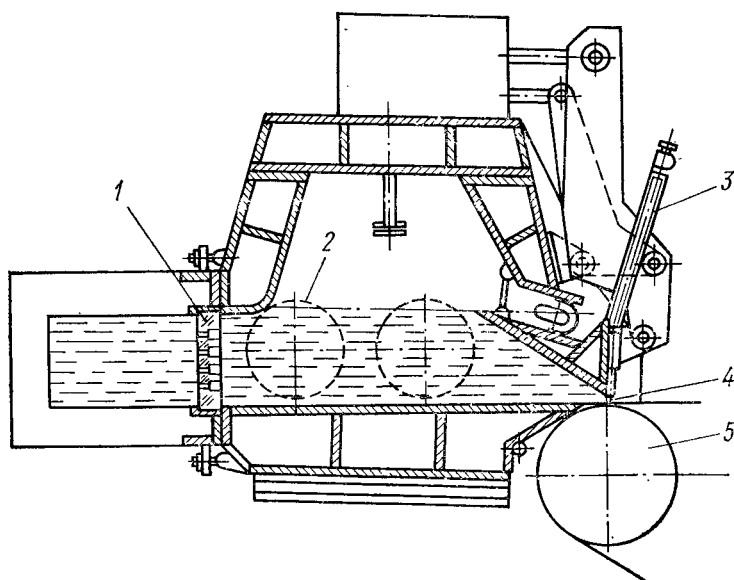


Рис. 34. Напорный ящик закрытого типа усовершенствованной конструкции

1 — перфорированная плита; 2 — перфорированный вал; 3 — механизм регулировки выпускной щели; 4 — выпускная щель; 5 — грудной вал

ниям. В дальнейшем были созданы конструкции напорных ящиков, спроектированных на базе разработанной к тому времени в отечественной практике гидродинамической теории водоволокнистых суспензий [54] (рис. 34). Эти конструкции еще имели некоторые особенности первых закрытых напорных ящиков, поскольку в них оставались перфорированные валы для перемешивания суспензии и дефлокуляции. В то же время принципиально новым подходом к решению задач подготовки и транспортирования водоволокнистой суспензии явились перфорированные разделительные плиты, значительное упрощение конфигурации проточных каналов и конструкции напорных ящиков как таковых.

Следует подчеркнуть, что прототипом современных напорных ящиков гидродинамического типа (рис. 35), конструкция которых целиком базируется на гидродинамической теории волокнистой суспензии, являются напускные устройства, появившиеся еще в 30-х годах нашего столетия, когда впервые возникла проблема ускорения подачи водоволокнистой суспензии. Однако специфические свойства течения суспензии этого типа, не известные в тот период, не позволили найти удовлетворительное конструктивное решение. Лишь спустя примерно 40 лет специалисты целлюлозно-бумажной промышленности, опираясь на созданную теорию, смогли рассчитать и сконструировать напускные устройства подобного типа. Стремление повысить надежность напускного устройства привело сначала к уменьшению перфорированных валиков (см. рис. 34)

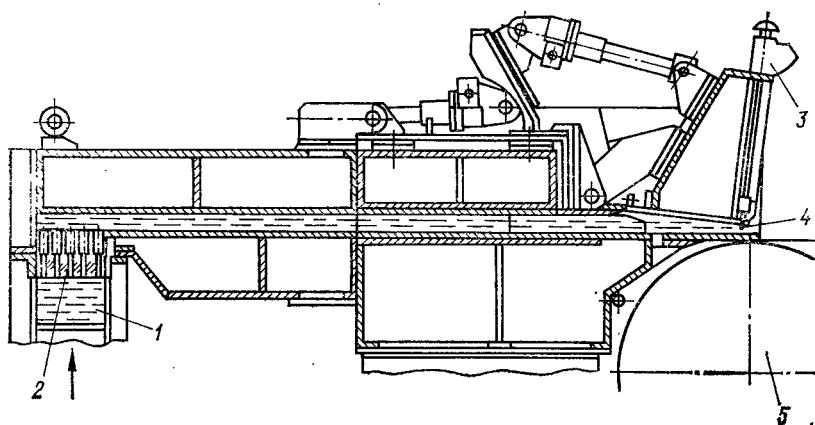


Рис. 35. Напорный ящик гидродинамического типа

1 — впускной коллектор; 2 — перфорированная плита; 3 — механизм регулировки выпускной щели; 4 — выпускная щель; 5 — грудной вал

и усовершенствованию их привода, а в дальнейшем к замене их на перфорированные плиты.

Наконец, потребовалось создание надежно работавших механизмов тонкой регулировки верхней выпускной губы, улучшение системы автоматического регулирования скорости выпуска суспензии из напорного ящика и т. п. Напорный ящик современной бумагоделательной машины обеспечивает требуемые параметры суспензии при ширине сетки свыше 8—9 м и скорости истечения суспензии до 900—1000 м/мин.

Значительные изменения претерпел также сеточный стол бумагоделательной машины третьего поколения. Так, регистровые валы (рис. 36, б), которые в свое время значительно увеличили эффективность обезвоживания полотна на сеточном столе и срок службы сеток, оказались непригодными для широкого использования, поскольку исключали возможность активно регулировать процесс формования и обезвоживания полотна на больших скоростях,

что приводило к резкому ухудшению качества бумаги и картона, а также и большим потерям наполнителей. Качественное обезвоживание и формование полотна бумаги на скорости свыше 600 м/мин по существу оказалось невозможным вследствие возрастания разрежения в сбегающем клине регистрового валика, пропорционального квадрату скорости движения. Количество удаляемой регистровым валиком воды, а значит, и скорость ее удаления имеют степенную зависимость, которая справедлива лишь до определенного предела роста скорости (примерно до 640—650 м/мин), после чего из-за внешних влияний, приводящих к подскоку суспензии, невозможно получить качественное формование и обезвоживание.

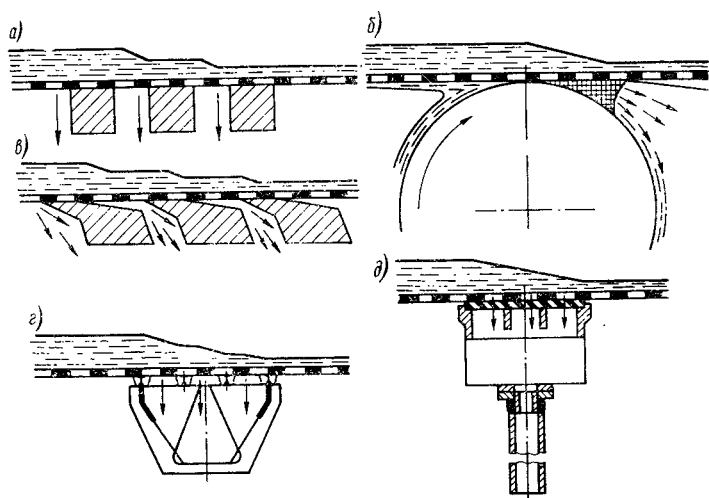


Рис. 36. Примеры усовершенствования конструкций обезвоживающих элементов сеточного стола в процессе его развития: а — неподвижные планки; б — регистровый валик; в — гидро-планки; г — низковакуумный отсасывающий ящик с гидро-планками; д — отсасывающий ящик

ние полотна. Величина разрежения, создаваемого валиком, при нормальных условиях имеет теоретический предел 844,2 м/мин, превысить который невозможно. Попытка применить рифленные регистровые валы, т. е. механически снизить эффект обезвоживания, не решила проблемы. Необходимо было создать такие обезвоживающие элементы, которые позволили бы плавно регулировать процесс формования и обезвоживания на сеточном столе. Поэтому конструкторы вновь обратились к неподвижным обезвоживающим элементам (рис. 36, а), применявшимся еще на первой стадии развития, и использовали их уже в новом качестве (рис. 36, в). Интенсивность обезвоживания обеспечивалась гидродинамическим профилем элементов или установкой угла атаки относительно сетки. Кроме того, появились низковакуумные отсасывающие ящики (рис. 36, г), которые обеспечивали плавную регулировку процесса

обезвоживания. Наконец, сочетание отсасывающих ящиков и гидропланок позволило создать их симбиоз (рис. 36, д), в котором рационально были решены вопросы обезвоживания и плавности его регулирования.

Применение неподвижных обезвоживающих элементов в

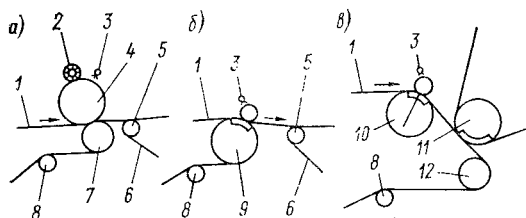


Рис. 37. Схема передачи бумажного полотна с сеточной в прессовую часть: а — гауч-пресс, машины первой стадии развития; б — отсасывающий гауч-вал, машины второй стадии; в — пересасывающий вал, машины третьей стадии

1 — сетка; 2 — шаберный валик; 3 — спрыск; 4 — гауч-вал с суконным маншоном; 5 — сукноведущий приемный валик; 6 — сукно пресса; 7 — нижний вал гауча; 8 — сетковедущий вал; 9 — отсасывающий камерный гауч-вал; 10 — отсасывающий двухкамерный вал; 11 — пересасывающий вал; 12 — сеткоповоротный вал

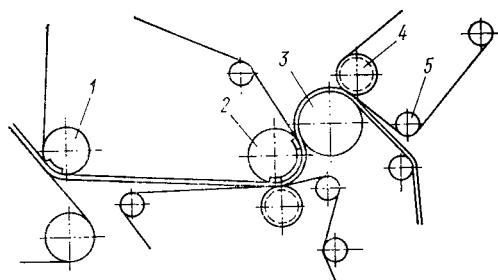


Рис. 38. Схема прессовой части с закрытой проводкой полотна

1 — пересасывающий вал; 2 — отсасывающий вал; 3 — гранитный вал; 4 — желобчатый вал; 5 — сукноведущий вал

формования и обезвоживания полотна бумаги на сеточном столе.

Как уже упоминалось, большое количество обрывов, возникавших во второй стадии развития бумагоделательных машин, было ликвидировано путем включения в их конструкцию нового агрегата — пересасывающего устройства, эволюция развития которого показана на рис. 37. Это автоматизированное приспособление в виде перевернутого отсасывающего вала, который через сукно

третьей стадии развития бумагоделательных машин было бы невозможно, если бы не появились новые высококачественные материалы (керамические и полимерные) с низким коэффициентом трения скольжения и высокой износостойкостью.

Их стали применять для изготовления элементов сеточного стола, рабочие органы которых соприкасаются с сеткой. Кроме того, были созданы сетки из новых синтетических материалов, износостойкость которых повысилась практически на порядок. Эти конструктивные решения обеспечили необходимую интенсификацию процессов обезвоживания и формования без ухудшения качества вырабатываемой продукции. Начали применять различные химикаты, а также подогрев водоволокнистой суспензии и стимулирующие процессы разделения воды и волокна, которые в известной степени повысили эффективность технологических процессов

после гауч-вала пересасывает на него с сетки бумажное полотно и транспортирует его в прессовую часть. Пересасывающий вал явился предвестником созданной в дальнейшем новой схемы «мокрой» части бумагоделательной машины, обеспечивающей в настоящее время полностью закрытую проводку полотна без свободных участков.

Ликвидация обрывов при передаче полотна с сеточной части в прессовую с помощью отсасывающего вала лишь ненадолго обеспечила устойчивую работу бумагоделательной машины, поскольку при дальнейшем росте скорости обрывы переместились в межпрессовую зону и также стали сдерживать рост скорости. Поэтому усовершенствование прессовых частей пошло по пути интенсификации обезвоживания, что повышало прочность бумаги и уменьшало обрывы на свободных участках. Когда же этого оказалось недостаточно, пришлось разработать новую схему прессовых частей, которая сначала свела к минимуму количество и длину свободных участков, а затем полностью их исключила (рис. 38).

Появлению прессовой части с закрытой проводкой полотна предшествовали различные конструктивные и схемные варианты, частично или полностью решающие этот вопрос. К таким конструкциям относятся: двухвальные прессы с желобчатым валом, с подкладной сеткой, с валом, обтянутым сеткой-чулком, прессы с промежуточным валиком. К этому разряду следует отнести и трехвальные прессы типа «Твинвер пресс», «Юнипресс», «Кlover-пресс», а также различные конструкции валов с регулируемым прогибом.

Высокая интенсификация процессов обезвоживания при линейном давлении между валами до 1020 Н/см (100 кг/см) и высоких скоростях потребовала значительного усовершенствования механизмов кондиционирования сукон и управления их ходом. Существенное развитие получили также автоматические системы заправки полотна. Эти новшества значительно изменили внешний облик прессовой и сеточной частей бумагоделательных машин: сократившись по длине, они стали более высокими. Обслуживание машин значительно усложнилось. Потребовалось создание специальных приспособлений и механизмов, без которых современные конструкции «мокрых» частей бумагоделательной машины по существу невозможно эксплуатировать (рис. 39).

В отличие от «мокрой» части, сушильная часть машины оказалась весьма консервативной и на третьей стадии развития. В частности, самая распространенная схема — с шахматным расположением цилиндров остается неизменной до сих пор. Причин здесь несколько. Во-первых, отбор влаги из бумаги в сушильной части начинается тогда, когда этот процесс затруднен, и механические способы, применяемые в мокрой части машины, осуществить его не могут. Оставшаяся межволоконная влага прочно удерживается благодаря гидрофильности волокон, а внутриволоконную влагу можно убрать только термическим путем, который, как известно, отличается большой инерционностью и энергоемкостью. Кроме того,

количество подводимого к бумаге тепла ограничивается ороговением волокон, приводящим к резкому снижению качества бумаги. Эти противоречивые факторы привели к тому, что сушильная часть бумагоделательных машин по существу подвергается лишь усовершенствованию без принципиальных изменений. К концу первой стадии развития самой распространенной была схема с двухъярусным шахматным расположением цилиндров, разделенная на приводные группы. Заменить малопроизводительный контактный способ сушки бумаги до сих пор не удастся, поэтому усилия кон-

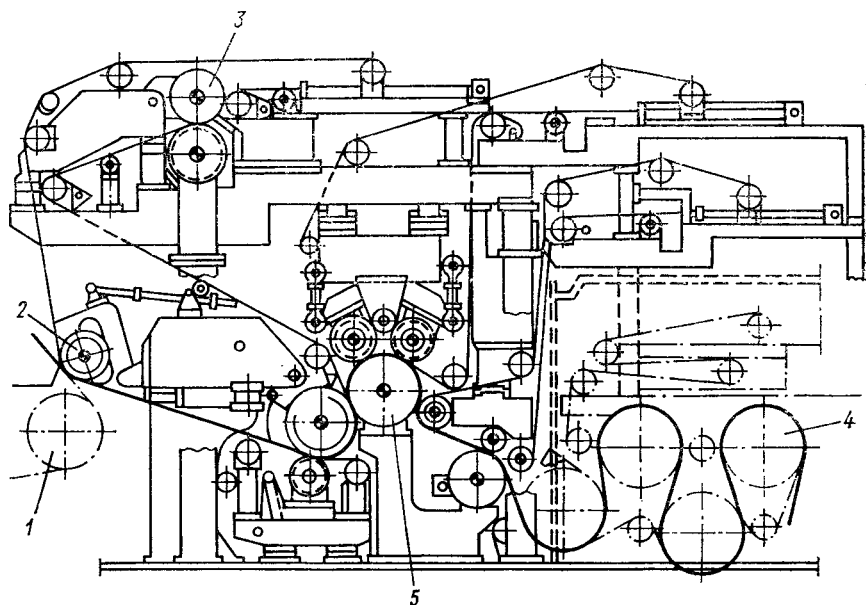


Рис. 39. Схема современной прессовой части бумагоделательной машины

1 -- сесточная часть; 2 -- пересасывающий вал; 3 -- сукномойка вальцевая прессовая; 4 -- сушильная часть; 5 -- пресс с четырьмя захватами

структоров направлены на то, чтобы обеспечить необходимую скорость удаления влаги термическим путем.

Сушильная часть современных бумагоделательных машин является самой тяжелой по массе, громоздкой и дорогостоящей (до 50 % общей стоимости машины). Ее возможности в отношении роста удельных съемов полотна с 1 м² поверхности сушильных цилиндров практически исчерпаны. Вместе с тем подлинным барьером для дальнейшей интенсификации работы является механика проводки полотна в сушильной части, поскольку высокие скорости вызывают явление флаттера на свободных участках движения бумаги между сушильными цилиндрами и приводят к ее обрывам.

Во второй стадии развития сушильная часть стала сдерживать рост скорости из-за инерционности процесса сушки. Повышение

давления пара в цилиндрах было эффективным до наступления ороговения волокон на поверхности полотна. Как средство интенсификации процесса сушки и его удешевления появились конструкции, реализующие процесс конвективной сушки. Сначала это были устройства для эвакуации паровоздушной смеси (рис. 40, а),

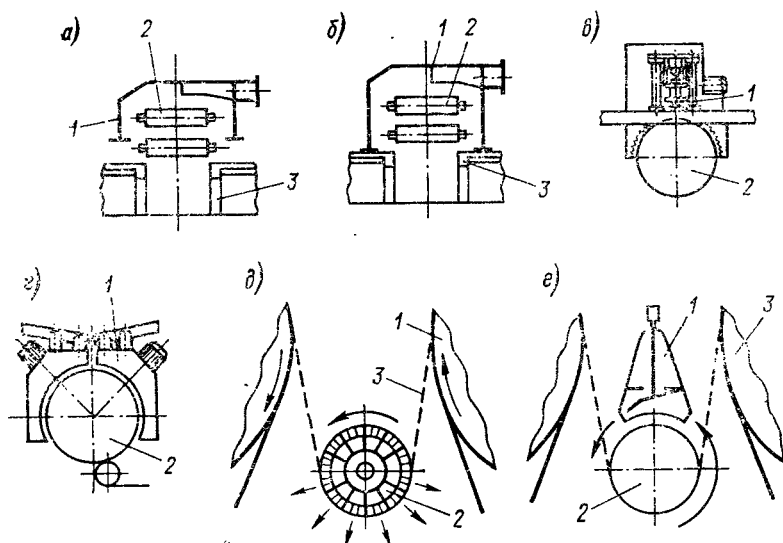


Рис. 40. Схемы развития элементов сушильных частей бумагоделательной машины

а — сушильная часть с вентиляционным колпаком открытого типа

1 — колпак вентиляционный; 2 — сушильные цилиндры; 3 — фундаментные конструкции

б — сушильная часть с вентиляционным колпаком закрытого типа

1 — колпак вентиляционный; 2 — сушильный цилиндр; 3 — фундамент второго технологического яруса машины

в — конвективный сушитель

1 — сушитель; 2 — сушильный цилиндр

г — колпак скоростной сушки

1 — колпак; 2 — сушильный цилиндр

д — сукнопродувное устройство

1 — сушильный цилиндр; 2 — сукнопродувной вал; 3 — сукно

е — устройство для продувки межцилиндровых пространств

1 — коллектор; 2 — сукноведущий валик; 3 — сушильный цилиндр

затем в помощь контактному способу сушки были разработаны схемы с циркуляцией кондиционированного воздуха и паровоздушной смеси и регенерацией тепла в закрытых контурах (рис. 40, б). В качестве локальных средств интенсификации сушки стали применять конвективные сушители, устанавливаемые в начале сушильной части на несколько цилиндров (рис. 40, в), а также устройства

для продувки сухим кондиционированным воздухом межцилиндровых пространств (рис. 40, *е*). Для более эффективной сушки сукон дополнительно к сукносушильным цилиндрам начали применять сукнопродувные валики (рис. 40, *д*). Наконец, мощным средством интенсификации сушки явились колпаки скоростной сушки (рис. 40, *з*).

В третьей стадии развития хлопчатобумажные сушильные сукна вытесняются термостойкими синтетическими сетками. Для борьбы с флаттером полотна на свободных участках применяют возможное сближение цилиндров в начале сушильной части, пока полотно еще влажное и непрочное. Очевидно, радикальным средством решения этой задачи была бы реализация закрытой проводки полотна по сушильной части. Над этим в настоящее время интенсивно работают конструкторы бумагоделательных машин, но работы еще не вышли за пределы поисков и экспериментов.

Таким образом, и во второй, и в третьей стадии сушильная часть бумагоделательных машин развивалась по принципу экстенсивного развития, причем рост скорости обеспечивался ими в основном за счет пропорционального увеличения рабочих органов с использованием устройств конвективной сушки для интенсификации процесса. Имеются конструкции сушильных устройств, полностью основанные на принципе конвективной сушки, но они применяются в специальных случаях.

Поскольку усовершенствование отдельных частей машины проходило, с одной стороны, путем реализации принципов, присущих только им, а с другой — зависело от развития других частей машины, а также от достижений науки и техники в целом, процесс этот следует рассматривать как единый, в котором возможности любого компонента являются необходимым условием общего прогресса. Характерным примером может служить ситуация, сложившаяся в развитии приводов бумагоделательных машин. В настоящее время эта часть машины располагает большими возможностями благодаря созданию многодвигательных приводов с тиристорными преобразователями, которые пришли на смену электромашинным. Возможности тиристорных приводов не исчерпаны, они могут обеспечить надежную работу машин далеко за пределами современных скоростей (1000 м/мин) [50]. Точность же регулирования соотношения скоростей смежных секций (0,02 %) при общих мощностях регулируемого привода до 4500 кВт и более еще полностью конструкторами бумагоделательных машин не используется. Успешные испытания новых электродвигателей, основанных на явлении сверхпроводимости, открывают новые возможности усовершенствования электропривода бумагоделательных машин на последующих стадиях развития.

В третьей стадии значительное конструктивное улучшение претерпели каландры, в которых наметилась устойчивая тенденция снижения количества валов с 6—8 (во второй стадии) до 3—4. Точность обработки полотна потребовала создания каландровых валов с регулируемым прогибом. Они позволяют получить значительно лучшие геометрические параметры в захватах при одновре-

менном повышении линейного давления и точности его регулирования. Созданы устройства для мгновенного разведения валов, которые повышают долговечность валов при внезапных обрывах полотна.

Рост скорости бумагоделательных машин в третьей стадии потребовал соответствующего усовершенствования машин и аппаратов, реализующих другие основные и вспомогательные процессы. В системах очистки суспензии получили развитие конические очистители различных модификаций, закрытые узлоловители с гидродинамическими устройствами для очистки сит, деаэраторы и вакуумные вихревые очистители, вакуумкомпрессоры турбинного типа и т. п.

Наконец, принципиально важным в третьей стадии развития является усовершенствование функций систем автоматизации бумагоделательных машин. Современные их конструкции имеют до 350 систем контроля и дистанционного управления. Оказалось, что поддерживать рациональные режимы работы на современных скоростях трудно или невозможно, поскольку громоздкость и сложность машин требуют оперативного вмешательства для управления соотношением многочисленных параметров с быстродействием, превышающим возможности оперетора. Системы автоматического регулирования эти задачи решать не могут, они способны лишь поддерживать заданные параметры с нужной точностью. Например, изменение скорости машины в некоторых пределах для поддержания нужных качественных показателей полотна бумаги требует одновременного воздействия на параметры системы электропривода, паропровода, напорного ящика, смесительного насоса и т. д. Системы автоматического регулирования с этой задачей не справляются, так как они не предназначены для поддержания рационального соотношения параметров работы систем. Требования к точности поддержания параметров и количество этих параметров постоянно возрастали, все это снижало возможности созданных конструкций машин и по существу приводило к потерям их производительности.

Потребовалось создание систем автоматического управления бумагоделательными машинами, базирующихся на принципах оптимизации сочетания многих взаимосвязанных факторов. Так были созданы автоматические системы управления технологическими процессами (АСУТП). Сейчас все большее количество машин оснащают такими системами, включающими электронно-вычислительные машины, специально разработанные для этих целей. Тем не менее в настоящее время темпы роста скорости бумагоделательных машин падают, несмотря на высокую рационализацию осуществляемых технологических процессов целлюлозно-бумажного производства с помощью вычислительной техники. Примерно с 70-х годов нашего столетия это стало проявляться все заметнее. Причиной такого явления оказался сам принцип производства бумаги из водоволокнистой суспензии. Достигнутые скорости формования и обезвоживания бумажного полотна подошли к теоретическому пределу, преодолеть который невозможно, так как удаляемая из

пространственной решетки сформированных волокон влага вследствие высокой плотности и вязкости разрушает полотно, и бумажный лист существенно теряет качественные показатели.

Уже более 20 лет ведутся поиски путей решения задачи преодолеть снижение темпов роста производительности машин. Поиски ведутся в разных областях, из которых две — наиболее выраженные. Первая область — технологическая. Специалисты пытаются ослабить связи сцепления воды и волокон с помощью подбора температурного режима суспензии, наиболее выгодного для обезвоживания полотна, и добавки для тех же целей химических веществ. Разумеется, эти меры небезуспешны, однако они удорожают процесс и не дают радикальных результатов по ускорению обезвоживания из-за близости теоретического предела обезвоживания. Вторая область поисков — новые конструктивные решения. Еще в начале 60-х годов американская фирма «Блэк Клаусон» испытала новую конструкцию сеточного стола типа «Вертиформа», принцип которой, в отличие от традиционного одностороннего обезвоживания, основан на сокращении пути отведения воды, направляемой на два противоположных фронта обезвоживания. Путь удаляемой воды в полотне сократился вдвое, значительно уменьшились фильтрационные потери; соответственно появилась реальная возможность повысить скорость формования и обезвоживания полотна. Этот принцип, повысив показатели качества бумаги (такие как анизотропность, одинаковость показателей обеих поверхностей полотна, поскольку обе они прилегают к сеткам, и др.), породил, однако, проблемы увеличения провала волокна и наполнителей. Появились также трудности в обеспечении синхронности работы обеих сеток. Таким образом, здесь можно видеть одновременное воздействие прогрессивных и регрессивных факторов.

В настоящее время способ формования и обезвоживания полотна бумаги между двумя сетками насчитывает более 150 запатентованных конструкций. Наибольшее распространение получили конструкции фирм «Белойт» (США), «Валмет» (Финляндия), «Фойт» (ФРГ), «Доминион» (Канада). Однако эти решения все же не являются радикальными, поскольку сокращение в два раза пути фильтрации не уменьшило в такой же степени сопротивление фильтрации, породив при этом ряд технологических трудностей. Были также и другие попытки решить задачу роста производительности бумагоделательных машин, в частности за счет увеличения ширины формуемого полотна. Именно этим путем шли конструкторы на всем протяжении существования бумагоделательных машин (см. рис. 22). Анализ кривой роста ширины на рис. 22 показывает, что увеличение ширины имеет два этапа: ускоренного развития и замедления. Это обусловлено самой конструкцией двухопорных тел вращения, из которых состоят основные рабочие органы машины. Они должны обладать определенными показателями поперечной жесткости, допустимой вибрации, долговечности и т. п. Темпы роста ширины ускорялись, пока не были исчерпаны возможности созданных материалов и силывов по прочностным и другим показателям. Увеличение расстояния между опорами свыше

8—10 м резко ухудшает эти и другие параметры, приводя к неадекватному удорожанию машины. Компенсация прогиба валов с помощью бомбировки при больших межопорных расстояниях малоэффективна. Поэтому разрабатывают сложноопорные конструкции полых валов, как малонагруженных (регистражные, сетко- и сукноведущие), так и сильно нагруженных (прессовые, каландровые) с компенсацией прогиба и его регулированием. Такие конструкции значительно более сложны и дорогостоящи, их применение оправдано с технико-экономической точки зрения лишь при создании новых целлюлозно-бумажных предприятий. Модернизация действующих, как показал опыт, трудно решается при «вписывании» в существующие здания более скоростных конструкций, уве-

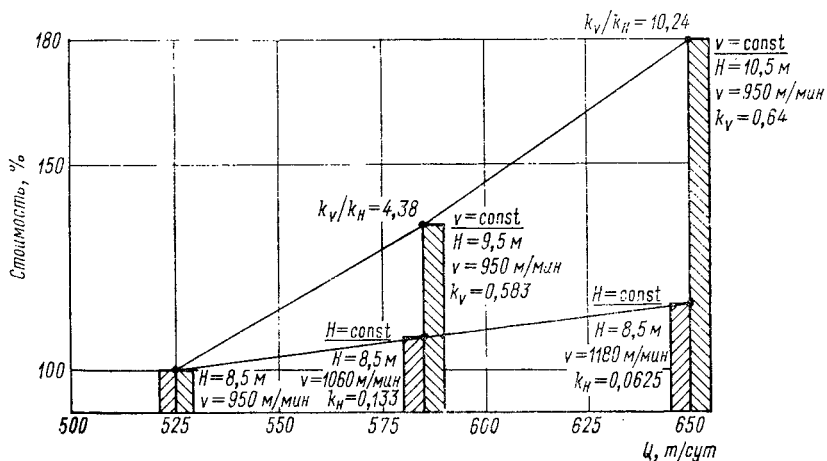


Рис. 41. Соотношение стоимости бумагоделательных машин для производства газетной бумаги при достижении одной и той же производительности за счет роста скорости работы и ширины полотна

H — ширина, м; v — скорость, м/мин; k_v — коэффициент скорости; k_H — коэффициент ширины; Q — производительность, т/сут

личение же ширины при этом возможно лишь в исключительных случаях. Строить широкоформатные машины для новых фабрик также менее выгодно, чем скоростные, рассчитанные на ту же производительность.

Сказанное хорошо иллюстрируется рис. 41, из которого очевидна экономическая невыгодность достижения роста производительности за счет увеличения ширины машины. Кроме того, заводы бумагоделательного машиностроения и смежные предприятия оснащены оборудованием, рассчитанным на определенные габариты обрабатываемых деталей. Замена оборудования сопряжена с большими материальными расходами, затратами времени и техническими трудностями.

Таким образом, техническая и экономическая ситуация 80-х годов в бумагоделательном машиностроении характеризуется,

с одной стороны, затуханием роста производительности машин, их удорожанием, с другой — интенсификацией попыток решить задачу различными мерами, которые нельзя признать радикальными. По-видимому, требуются новые перспективные принципы, на которых должен основываться технологический процесс производства бумаги, удовлетворяющий по технико-экономическим показателям современным требованиям.

Чтобы завершить характеристику третьей стадии развития бумагоделательных машин, отметим еще одно важное обстоятельство. Третья стадия характерна резким укрупнением мощности технологических потоков целлюлозно-бумажного производства. При этом по экономическим соображениям сведены к минимуму все буферные емкости для межоперационного хранения полуфабрикатов, что выдвинуло на первый план надежность функционирования всех систем, которые практически не имеют резервирования. Технологические схемы стали однопоточными, в основном с последовательным расположением оборудования. Созданы непрерывные, с жесткими связями производственные потоки, включающие размол, сортирование, очистку, подготовку композиции и реализацию самого процесса производства бумаги на машине.

Причины замедления роста производительности бумагоделательных машин привлекали внимание многих исследователей, которые придерживаются единой точки зрения. По их мнению, основными факторами, сдерживающими рост, являются достижение предела скорости обезвоживания плоскосеточных столов бумагоделательных машин, а также отсутствие новых конструкций.

Итак, третья стадия развития бумагоделательных машин характеризуется следующим:

- изменением принципиальной схемы, внедрением закрытой проводки полотна;
- узкой специализацией машин;
- дальнейшей интенсификацией процессов переработки полуфабрикатов на машине;
- оптимизацией технологических процессов путем применения средств АСУТП;
- повышением требований к надежности машин;
- применением научно обоснованных методов в системе специализированного обслуживания и ремонта с глубоким разделением труда.

Общие тенденции развития бумагоделательных машин и технических систем в целом

Как было установлено, эволюция бумагоделательных машин шла по пути механизации процесса водоволокнистого способа производства бумаги, который затем сопровождался автоматизацией отдельных операций. Каждой стадии развития соответствует свое поколение конструкций бумагоделательных машин, объединенных одним методом реализации технологического процесса. В недрах каждой предыдущей стадии зарождалась конструкция машин по-

следующей стадии, которые постепенно завоевывают приоритет благодаря более высоким качественным показателям и вытесняют машины предыдущего поколения, обеспечивая тем самым непрерывность и прогрессивность развития процесса.

Совершенствование бумагоделательных машин сопровождалось непрерывным усложнением их конструкций и увеличением габаритных размеров. При этом основные параметры развиваются прогрессивно, но неравномерно. Первая стадия, наименее динамичная по показателям, представляет собой период формирования бумагоделательных машин в линию непрерывного действия. Ручной труд на этой стадии оставался только на операциях управления и вспомогательных технологических процессах. Вторая стадия, ознаменованная автоматизацией отдельных технологических операций, явилась результатом усовершенствования метода механизации производства бумаги и дальнейшей интенсификации производственных процессов. Конструкции машин второго поколения также основаны на полной механизации процесса основного производства и автоматическом регулировании отдельных технологических операций. Третья стадия — стадия автоматического управления технологическим процессом — представляет собой следующую ступень усовершенствования взаимоотношений человека и машины. Машина уже не только полностью механизировала основной технологический процесс, автоматизировала поддержание на заданном уровне параметров отдельных операций, но и стала способной автоматически осуществлять процесс производства бумаги на принципе оптимального соотношения технологических показателей.

Динамика изменения параметров машин внутри каждой стадии неравномерна, она характеризуется двумя периодами: первым, когда имеет место ускорение темпов роста, и вторым, с замедлением темпов. Эта закономерность является важной характеристикой общего процесса развития. Наблюдается также хронологическая неравномерность. Если первая стадия длилась 100 лет, то вторая — 50, а прошедшие примерно 25 лет третьей стадии практически завершаются затуханием ее в настоящее время. Эта тенденция, отражающая общее влияние технического прогресса, также является глобальной. При этом хронологический цикл протекания стадий не совпадает со временем физического существования (точнее, функционирования) бумагоделательных машин. Машины старого поколения, как правило, эксплуатируются еще долгое время после появления на рынке машин нового поколения, хотя, разумеется, уже не отражают современный технический уровень, их использование обусловлено лишь экономическими соображениями.

Вместе со специализацией и развитием машин происходит изменение функций рабочих, обслуживающих машину. Первое поколение бумагоделательных машин, механизировавших конечную операцию основного процесса — намотку и сьем бумаги в рулонах — оставило за рабочими функции управления, выполнения вспомогательных процессов и ремонта на работающей машине в период ее остановов. Квалификация рабочего определялась умением поддерживать постоянный режим работы машины при переходе на:

другой вид продукции, обслуживать машину (правка одежды, смазка, удаление обрывов и т. п.) и ремонтировать ее. Разделение труда при этом по существу не наблюдалось.

Второе поколение машин, характеризовавшееся резким ростом скоростей, превысившим пределы быстроедействия физической реакции человека, вместе с усложнением конструкций и автоматизацией обусловило разделение труда обслуживающего персонала. Сменные службы механиков, энергетиков, специалистов по контрольно-измерительным приборам и автоматике, технологов, ремонтных бригад, также специализированных по видам работ, значительно увеличили численность персонала, обслуживающего машину, в то же время несколько снизилась численность сменных бригад, управляющих машиной. При этом выработка продукции на одного работающего резко возросла благодаря увеличению производительности машины.

Машины третьего поколения уже потребовали ведения всех технологических процессов, а также ремонта и обслуживания на оптимальных режимах, в противном случае возникают большие потери продукции, рабочего времени и вспомогательных материалов, использование машины становится неэффективным. Потребовалась замена эмпирических принципов всех работ по созданию и эксплуатации, характерных для машин первого и второго поколений, научно обоснованными. Точный расчет и конструирование после экспериментальных проверок новых идей, обеспечение надежности работы, разработка принципов научно обоснованного планирования ремонта и обслуживания стали фундаментом при создании и использовании бумагоделательных машин в третьей стадии.

До середины второй стадии создание новых конструкций базировалось на оригинальных решениях эвристическим путем с заимствованием опыта других отраслей машиностроения. История почти не сохранила имен создателей машин, талантливых механиков и изобретателей, усилиями которых была реализована механизированная линия непрерывного действия в виде бумагоделательной машины. Известны лишь некоторые западно-европейские специалисты, создатели отдельных конструкций машин (Л. Робер, Дидат, Дикинсон, Брагман, Мильспо, Венцель, Франк, Тримбей, Шихен, Вилликовист). Вместе с тем в обиход незаслуженно вошли имена владельцев предприятий (Донкин, Фурдринье, Берд и др.). В России созданием бумагоделательных машин до 30-х гг. нашего столетия практически не занимались, все оборудование для производства бумаги покупалось за рубежом. Первые теоретические работы в области производства бумаги также относятся к 30-м годам (Д. И. Лунд, К. Г. Клемм, Ф. Ф. Бобров, Ф. Гольдский, Н. Вундерлих, Э. Каван, С. А. Фотиев). Многие из этих работ принадлежат советским ученым.

Создание машин третьего поколения активизировало научные исследования. Появились глубокие теоретические работы, заложившие основу для исследования физических явлений, происходящих при реализации технологического процесса производства бумаги.

Авторами этих работ были П. П. Добровольский, И. Д. Кугушев, Н. М. Вальщиков, Дж. Тейлор, Г. Мюллер, Я. Бергстрем, К. Шмидт, О. А. Терентьев, В. И. Бирюков, П. А. Жучков, В. Брехт и др.

Отечественная целлюлозно-бумажная промышленность получила бурное развитие в послевоенные годы. В этот же период была создана отрасль отечественного целлюлозно-бумажного машиностроения. Разработка теоретической базы для целлюлозно-бумажного производства с учетом достижений смежных отраслей народного хозяйства явилась научной основой для решения проблем, присущих третьей стадии развития бумагоделательных машин, а также проблем ближайшего будущего этой отрасли промышленности.

Проводя ретроспективный анализ развития различных видов технических систем, мы обнаруживаем закономерности, подобные выявленным для бумагоделательных машин, что также свидетельствует об их инвариантности. Чтобы сделать их универсально применимыми, необходимо сформулировать основные положения выявленных закономерностей развития технических систем как таковых, а также создать аналитическую модель, адекватную этим закономерностям. Ниже это будет сделано на базе статистических данных и ретроспективного анализа развития бумагоделательных машин и показана возможность описания ими закономерностей развития других технических систем. Здесь же сформулируем главные принципы развития технических систем:

- 1) непрерывность и прогрессивность развития параметров;
- 2) неограниченность развития параметров во времени;
- 3) полистадийность развития при полном соответствии закону неравномерности и последовательной смены стадий, каждая из которых зарождается в недрах предыдущей и имеет теоретические пределы развития параметров.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследование закономерностей развития технических систем, помимо чисто познавательного интереса, преследует конкретную цель использования этих закономерностей на практике. Описать процесс изменения многообразных качественных характеристик технических систем с учетом постоянного многофакторного влияния внешней среды практически невозможно. Вместе с тем любая техническая система может быть достаточно полно охарактеризована некоторыми показателями, отражающими ее сущность. Для бумагоделательных машин как орудий труда главный показатель — производительность. Другие характеристики машины могут быть также описаны техническими параметрами. Например, технический уровень ее отображается рядом установленных для технических средств показателей, учитывающих функциональные, технические и экономические свойства. За изменением таких показателей проследить значительно легче, можно установить их взаимодействие с другими показателями. Иными словами, любую техническую систему можно представить как комплекс символизированных показателей, отображающих с той или иной степенью полноты ее главные и частные свойства. Составление такой модели является основным методическим приемом для изучения системы в целом. Поскольку закономерности развития бумагоделательных машин исследованы нами наиболее полно, построение аналитической модели развития этих систем целесообразно осуществить на базе их главного параметра — производительности, точнее, скорости, которая жестко связана с производительностью. Если построенная модель будет пригодна для аппроксимации статистических данных развития параметров других технических систем, ею можно будет пользоваться как для изучения самих процессов развития, так и в целях планирования и прогнозирования.

3.1. Оценка методов прогнозирования

Современным народным хозяйством невозможно управлять без учета будущего развития всех его сфер. Принято прогнозировать его развитие кратковременно (1—2 года), среднесрочно (5—10 лет), долгосрочно (15—20 лет) и сверхдолгосрочно (50—100 лет). По мере роста длительности прогноза степень точности его падает, прежде всего по причине трудностей самого предска-

зания. Методы решения этой задачи далеки от совершенства, поскольку не базируются на точной интерпретации объективных закономерностей развития прогнозируемого процесса.

Существуют три метода прогнозирования: метод моделирования, метод экстраполяции тенденций и метод экспертных оценок [8]. На их основе, как уже говорилось, разработано более 130 способов, применяемых для различных уровней: глобальных — для земного шара в целом, для отдельных государств и внутригосударственного, который в свою очередь включает межотраслевые, внутриотраслевые уровни вплоть до отдельных предприятий и их подразделений [14, 15, 40, 50, 58].

Ретроспективный анализ развития прогнозируемых процессов, интерпретируемый в виде таблиц или графических изображений, позволяет находить их математические зависимости как функции времени. Математические модели подбирают для аппроксимации ретроспективных закономерностей и для предвидения тенденций путем экстраполяции. При этом полагают, что они сохраняются на известном отрезке времени прогнозирования и что адекватность такой модели достаточна.

Все три метода прогнозирования имеют существенные недостатки. Самый точный из них — метод моделирования — предполагает наличие адекватной процессу модели, которая может быть создана достаточно точной лишь на базе ретроспективных закономерностей; при этом пригодность ее для оценки перспективы этого развития не обосновывается с достаточной степенью точности. Априорное утверждение, что развитие тенденции прогнозируемого процесса сохраняется в будущем (метод экстраполяции), приемлемо на коротком отрезке времени, когда расхождение с реальным развитием еще допустимо. Метод экспертных оценок построен на субъективных представлениях отдельных специалистов возможных тенденций развития, которые обрабатываются достаточно точно в дальнейшем.

Таким образом, все три метода прогнозирования имеют существенный общий недостаток — отсутствие достоверных параметров, характеризующих законы развития анализируемого процесса не только в прошлом, но и в будущем, что снижает их достоверность.

При анализе развития любого процесса необходимо для орудий труда учитывать технические, экологические и исторические факторы, суммарное взаимодействие которых определяет это развитие. Поэтому математическая корреляционная зависимость между изменениями параметров во времени является лишь отображением воздействия глобального развития техники, экономики и социальных преобразований. Они в свою очередь тоже изменяются. Поэтому связь между параметрами орудий труда и временем — опосредованная. Из этого следует вывод, что любая интерпретация развития процесса должна базироваться на знании объективных законов, обуславливающих его качественные характеристики. Любой другой подход может раскрыть лишь частные свойства процесса развития.

Разнообразие процессов развития различных систем материального мира, а также динамичность их изменения во времени обусловили различные методы их аппроксимации, о которых уже говорилось. Широко применяемые методы наименьших квадратов, кусочно-гладкой аппроксимации и др. не дают достаточной степени точности, а главное, не позволяют достоверно прогнозировать изменение процессов в будущем. Очевидна также низкая точность линейной экстраполяции кривых из-за явно выраженной неопределенности и нелинейности процессов развития систем как в прошлом, так и в будущем.

Очевидно, такие процессы могут быть описаны другой моделью, которая должна качественно характеризовать весь процесс развития во времени, каким бы сложным он ни был.

Выявленные на примере бумагоделательных машин стадии развития технических систем отражают этапы непрерывного совершенствования выполняемых ими функций и связанные с этим совершенствования конструкций. Течение рассматриваемых процессов обусловлено сложными причинно-следственными связями. Правомерна постановка вопроса об адекватности полистадийного развития технических систем в целом.

Уже отмечалось, что сложные процессы развития систем, в частности изменение главных параметров, невозможно описать уравнением Перла или Гомперца, потому что графическая их интерпретация не дает удовлетворительных совпадений. Более того, можно утверждать, что стадии развития, имея много общего, существенно различаются своими характеристиками. Это значит, что для их аппроксимации необходим математический аппарат, который с достаточной гибкостью мог бы интерпретировать изменения статистических данных как фактора, объективно существующего в процессе развития любой технической системы. Вместе с тем очевидно, что развитие биологических систем наиболее точно описывают кривые Перла или Гомперца. Довольно точно можно аппроксимировать изменение ширины бумагоделательной машины (см. рис. 22) формулой Перла, поскольку этот процесс претерпевает изменения только в пределах одной стадии. Многостадийный же процесс, очевидно, можно попытаться интерпретировать, подобрав соответствующее уравнение для аппроксимации статистических данных каждой стадии. Однако в этом случае математическая модель должна обладать большей гибкостью, чем зависимости Перла и Гомперца, т. е. иметь большее количество коэффициентов.

Если принять как рабочую гипотезу утверждение, что многостадийный процесс развития любой технической системы можно описать соответствующим количеством уравнений S-образных кривых, то они должны иметь общий исход и должны быть сдвинуты по оси абсцисс в соответствии с хронологической сменой анализируемых стадий развития. Если получится одно уравнение, оно в общем виде должно удовлетворять качественным характеристикам любой стадии развития.

Если попытаться графически интерпретировать таким образом стадии развития скорости бумагоделательных машин (рис. 42), можно увидеть, что они представляют собой три S-образные кривые, имеющие общее начало и сдвинутые относительно друг друга по оси абсцисс.

Статистические данные изменения тех или иных параметров больших технических систем отражают результаты одновременного воздействия факторов, обусловленных объективными законами. Если все положительные и отрицательные воздействия объективных законов на процесс развития технических систем представить в виде одновременного воздействия двух групп факторов — прогрессивных и регрессивных, то с учетом сказанного очевидно, что статистические данные изменения тех или иных параметров отражают результаты одновременного воздействия именно этих прогрессивных и регрессивных факторов на исследуемый процесс развития. Соотношения интенсивности их воздействия во времени обуславливают сложность графической структуры общих закономерностей развития, которые для скорости бумагоделательных машин в настоящее время состоят из трех S-образных кривых, каждая из которых отражает соответствующую стадию развития и имеет свой предел при $t \rightarrow \infty$.

Волнообразный характер кривой роста скорости бумагоделательных машин (см. рис. 21) объясняется тем, что она является результирующим показателем, полученным путем интерполяции статистических данных и не раскрывает внутренней сущности причин и следствий, обусловивших различный темп изменения скорости во времени.

Таким образом, развитию технических систем свойственна многостадийность, усложняющая аппроксимацию статистических данных, если предварительно не проведен причинно-следственный анализ, способный раскрыть сущность сложной графической структуры закономерностей. Однако единообразный внешний вид кривых изменения статистических данных в каждой стадии позволяет надеяться на возможность создания инвариантной аналитической модели, достоверно описывающей весь процесс развития.

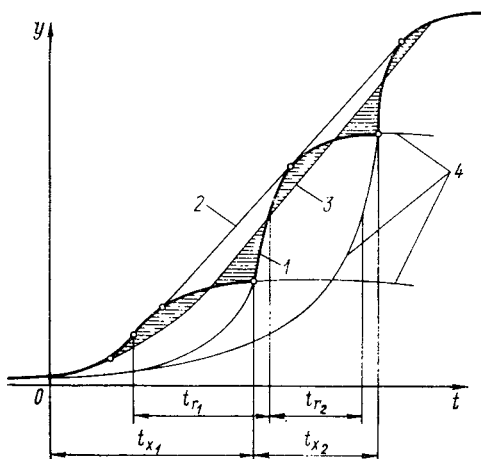


Рис. 42. Сопряженное семейство функций:

1 — линия активных участков; 2 — огибающая; 3 — медиана; 4 — функции разных стадий (t_r — геометрический шаг; t_x — хронологический шаг)

В этом случае мы сможем избежать трудностей, которые сопряжены с попытками аппроксимировать сложную графическую структуру хронологического изменения параметров какой-либо системы одной искусственно подобранной кривой или аналитической зависимостью.

3.2. Математическая интерпретация процесса развития¹

Рассмотрим возможность создания математической модели на примере развития скорости бумагоделательных машин. Обозначим изменение скорости во времени как некоторую функциональную характеристику развития.

$$y = y(t), \quad (3.1)$$

где t — время.

Эта модель характеризуется неограниченным ростом y во времени. В действительности с течением времени рост y ограничивается теоретическим пределом каждой стадии развития, поэтому необходима модель в виде нелинейного дифференциального уравнения, которое можно аппроксимировать степенным многочленом

$$dy/dt = a_1(t)y + a_2(t)y^2 + \dots + a_n(t)y^n. \quad (3.2)$$

Пусть $a_i(t) \equiv 0$ при $i \geq 3$.

Уравнение (3.2) является уравнением Бернулли, которое проинтегрируем, введя новую зависимую переменную $z = 1/y$. В соответствии с (3.2) z удовлетворяет уравнению

$$dz/dt = -a_1(t)z - a_2(t). \quad (3.3)$$

Будем искать решение уравнения (3.3) в виде произведения двух функций от t :

$$z(t) = z_1(t)z_2(t). \quad (3.4)$$

Дифференцируя обе части уравнения (3.4), находим

$$dz/dt = z_2(dz_1/dt) + z_1(dz_2/dt). \quad (3.5)$$

Подставив (3.4) и (3.5) в (3.3), получим

$$z_2(dz_1/dt) + z_1(dz_2/dt) = -a_1(t)z_1z_2 - a_2(t)$$

или

$$z_1[dz_2/dt + a_1(t)z_2] + z_2(dz_1/dt) = -a_2(t).$$

¹ Пп. 3.2—3.7 написаны совместно с докт. физ.-мат. наук, проф. Н. Н. Кушковым.

Выберем функцию $z_2(t)$ такой, чтобы

$$dz_2/dt + a_1(t)z_2 = 0;$$

тогда

$$dz_2/z_2 = -a_1(t) dt.$$

Интегрируя, получаем

$$z_2(t) = C_1 e^{-\int a_1(t) dt}. \quad (3.6)$$

Не пренебрегая общностью, можно положить произвольную постоянную C_1 равной единице. Для определения $z_1(t)$ имеем теперь уравнение

$$z_2(t) (dz_1/dt) = -a_2(t)$$

или

$$dz_1/dt = -a_2(t)/z_2(t).$$

Отсюда

$$z_1(t) = -\int [a_2(t)/z_2(t)] dt + C, \quad (3.7)$$

где C — постоянная интегрирования.

Подставив (3.6) и (3.7) в (3.4), найдем

$$z(t) = C e^{-\int a_1(t) dt} - e^{-\int a_1(t) dt} \int a_2(t) e^{\int a_1(t) dt} dt. \quad (3.8)$$

Таким образом, получена функциональная характеристика, описываемая дифференциальным уравнением (3.2) или уравнением

$$y(t) = [C e^{-\int a_1(t) dt} - e^{-\int a_1(t) dt} \int a_2(t) e^{\int a_1(t) dt} dt]^{-1}. \quad (3.9)$$

Это уравнение представляет собой аналитическую зависимость научно-технического развития параметров бумагоделательных машин.

Положим в (3.9)

$$a_2(t) \equiv 0; \quad a_1(t) \equiv b e^{kt},$$

где b и k — постоянные.

Получим:

$$\begin{aligned} y(t) &= 1 / (C e^{-\int b e^{kt} dt}) = 1 / (C e^{-\frac{b}{k} \int e^{kt} d(kt)}) = 1 / (C e^{-\frac{b}{k} e^{kt}}) = \\ &= 1 / (C e^{b_1 e^{kt}}) = \bar{C} e^{-\bar{b} e^{-kt}}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где $\bar{C} = 1/C$; $\bar{b} = -b/k$; $k = -\bar{k}$.

Уравнение (3.10) представляет собой кривую Гомперца. Из (3.9) можно получить и уравнение Перла, если положить

$$a_1(t) \equiv k_1;$$

$$a_2(t) \equiv k_2,$$

т. е. считать коэффициенты постоянными.

Тогда

$$y(t) = 1 / (C_1 e^{-k_1 t} - e^{-k_1 t} k_2 \int e^{k_1 t dt}) = 1 / (C_1 e^{-k_1 t} - k_2 / k_1) = \\ = - (k_1 / k_2) / [(C_1 k_1 / k_2) e^{-k_1 t} + 1] = L / (L_1 e^{-k_1 t} + 1), \quad (3.10')$$

где $L = -k_1 / k_2$; $L_1 = C_1 k_1 / k_2$, что представляет собой уравнение Перла.

Положим теперь в выражении (3.9)

$$a_1(t) \equiv k_1 e^{kt};$$

$$a_2(t) \equiv k_2 e^{kt}.$$

Получим:

$$y(t) = 1 / (C_1 e^{-\int k_1 e^{kt} dt} - e^{-\int k_1 e^{kt} dt} \int k_2 e^{kt} e^{\int k_1 e^{kt} dt} dt) = \\ = 1 / (C_1 e^{-\frac{k_1}{k} e^{kt}} - e^{-\frac{k_1}{k} e^{kt}} k_2 \int e^{kt} e^{\frac{k_1}{k} e^{kt}} dt) = \\ = 1 / [e^{-\frac{k_1}{k} e^{kt}} (C_1 - \frac{k_2}{k_1 k} \int e^{\frac{k_1}{k} e^{kt}} d \frac{k_1}{k} e^{kt})] = \\ = 1 / [e^{-\frac{k_1}{k} e^{kt}} (C_1 - \frac{k_2}{k_1 k} e^{\frac{k_1}{k} e^{kt}})] = \\ = 1 / (-\frac{k_2}{k_1 k} + C_1 e^{-\frac{k_1}{k} e^{kt}}) = L / (a + e^{b e^{-\beta t}}), \quad (3.11)$$

если положить здесь $L = 1/C_1$; $a = -k/k_1 k$; $b = -k_1/k$; $\beta = -k$.

С помощью соотношения (3.11) можно более гибко аппроксимировать статистические данные, чем уравнениями Перла и Гомперца, так как оно включает большее количество коэффициентов. Вместе с тем выражение (3.11) обладает всеми свойствами, присущими S-образным кривым при определенных указанных ниже условиях. Физические причины процессов, описываемых такими кривыми, хорошо прослеживаются на примере изменения скорости и ширины бумагоделательных машин, которое носит выраженный характер непрерывного прогрессирования с непостоянной интенсивностью по времени. Это объясняется наличием двух противоречивых комплексных факторов, одновременно воздействующих на процесс,— прогрессивного и регрессивного. Например, уже

говорилось, что количество удаляемой регистровым валиком воды при повышении скорости бумагоделательной машины имеет степенную зависимость. Но это справедливо лишь до скорости 640 м/мин. После превышения ее на регистровых валиках возникают неблагоприятные явления (подскок суспензии, просос воздуха, интенсивное обезвоживание, ухудшающее качество полотна, и т. п.), т. е. начинают активно действовать регрессивные факторы.

Рост ширины машин (прогрессивный фактор) определяется экономичным увеличением единичной мощности. Однако удельная металлоемкость имеет регрессивный характер и изменяется не пропорционально ширине, что связано с нормируемой стрелой прогиба двухопорных конструкций согласно общезвестному уравнению

$$f = gb^3(12l - 7b)/(384El), \quad (3.12)$$

где l — расстояние между опорами; b — ширина машины; f — стрела прогиба; g — линейное давление.

Кроме того, технические возможности машиностроения вносят определенные ограничения на увеличение ширины бумагоделательных машин. Аналогичное сочетание прогрессивных и регрессивных факторов прослеживается во всех конструкциях. Так, повышение вакуума в обезвоживающих элементах, необходимое для получения нужной сухости полотна в связи с ростом скорости, непропорционально увеличивает силы трения и износ трущихся деталей (сетки и покрытия обезвоживающих элементов). Необходимая интенсификация сушки бумаги в этих условиях требует повышения давления пара в сушильных цилиндрах, что ограничивается их прочностью и теплопроводностью. Применение новых материалов, улучшающих конструкцию машины, является прогрессивным фактором, а их дефицит и стоимость действуют как регрессивные факторы.

Можно продолжить это перечисление, но ограничимся ссылкой на примеры, содержащиеся в гл. 2.

Итак, дифференциальное уравнение $dy/dt = a_1(t)y + a_2(t)y^2$ охватывает три рассмотренных выше случая:

1. При $a_2(t) \equiv 0$; $a_1(t) \equiv be^{kt}$ — соотношение (3.9) трансформируется в формулу Гомперца.

2. При $a_1(t) \equiv k$; $a_2(t) \equiv k_2$, где k_1 , k_2 — постоянные величины, соотношение (3.9) представляет собой формулу Перла.

3. При $a_1(t) \equiv k_1e$, $a_2(t) \equiv k_2e^{ht}$ соотношение (3.9) трансформируется в четырехпараметрическую формулу

$$y = L/(a + e^{be^{\beta t}}).$$

Разрешим соотношения

$$y(0) = y_0 = L/(a + e^b) \text{ и } y(+\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = L/(a + 1)$$

относительно L и e^b .

Тогда

$$L = (a + 1) y_{\infty}; \quad e^b = (a + 1) (y_{\infty}/y_0) - a. \quad (3.13)$$

Результаты многочисленных расчетов показывают, что $a \leq 1$ ($a \sim 0,1$); вычисления производились по формуле

$$y = L / [a + e^{b e^{-\beta(t-t_0)}}].$$

Поэтому можно полагать

$$L = y_{\infty}; \quad e^b = y_{\infty}/y_0; \quad b = \ln(y_{\infty}/y_0). \quad (3.14)$$

Подставляя (3.14) в выражение (3.11), получаем

$$y = y_{\infty} / (a + e^{\ln(y_{\infty}/y_0) \Phi(t)})$$

и преобразуем

$$y_{\infty}/y - a = e^{\ln(y_{\infty}/y_0) \Phi(t)}.$$

Пренебрегая величиной a по сравнению с y_{∞}/y_0 , будем иметь

$$y_{\infty}/y = e^{\ln(y_{\infty}/y_0) \Phi(t)}.$$

Логарифмируя обе части, найдем

$$\ln(y_{\infty}/y) = \ln(y_{\infty}/y_0) \Phi(t)$$

или

$$\ln(y_{\infty}/y) / \ln(y_{\infty}/y_0) = \Phi(t).$$

Так как функция $\Phi(t)$ изменяется от единицы до нуля, то удобнее ввести новую функцию $\psi(t)$, изменяющуюся от нуля до единицы по формуле $\psi(t) = 1 - \Phi(t)$.

В рассматриваемом частном случае

$$\psi(t) = 1 - e^{-kt}. \quad (3.15)$$

Введем обозначение $y_{\infty} = n y_1$, где y_1 — значение y при $t \rightarrow \infty$ в первой стадии; n — некоторый коэффициент, причем $n \geq 1$. Для первой стадии $y_{\infty} = y_1$ ($n=1$), для второй $y_{\infty} = n_2 y_1$, для третьей $y_{\infty} = n_3 y_1$ и т. д.

Тогда

$$\psi(t) = 1 - \ln(n y_1 / y) / \ln(n y_1 / y_0) = \ln(y / y_0) / \ln(n y_1 / y_0).$$

Обозначив $\ln(n y_1 / y_0) = N$, получим $N \psi(t) = \ln(y / y_0)$, или в частном случае (3.15)

$$N (1 - e^{-kt}) = \ln(y / y_0). \quad (3.16)$$

Уравнение (3.16) показывает возможность аппроксимировать функцию (3.9) уравнениями экспоненты. Выше были приведены аппроксимирующие уравнения Гомперца (3.10) и Перла (3.10'). Уравнения (3.10)—(3.10') аппроксимируют общее уравнение функции развития (3.16) с различной степенью приближения. Точность описания увеличивается с числом постоянных величин, входящих в уравнение. В уравнениях (3.10), (3.10') по три постоянные величины, в (3.11)—четыре. В уравнении (3.9) число постоянных вели-

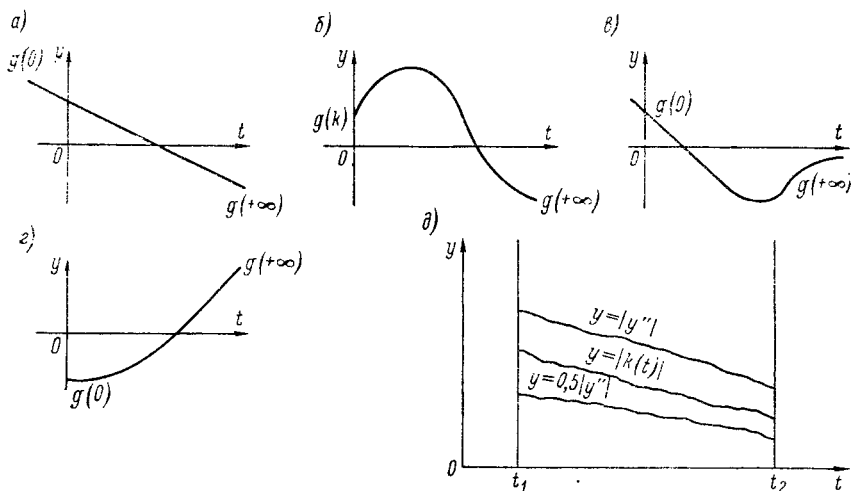


Рис. 43. Графическая интерпретация уравнения $g(t) = 0$

чин не ограничено. Введение числа постоянных величин более четырех непропорционально усложняет расчеты. Поэтому естественно, что аппроксимация уравнениями, содержащими число постоянных величин менее трех, т. е. линейной, показательной и логарифмической функциями, нерациональна.

Физический смысл постоянных коэффициентов в уравнении (3.11) определяется тремя величинами: L , a и b , которые выражают постоянное начальное значение функции при $t=0$, а величины L и a дают возможность найти ее предельное значение, когда $t \rightarrow \infty$. Коэффициент β , измеряемый в с^{-1} , является постоянной времени экспоненты. Коэффициент b — безразмерная величина. Отношение L/a имеет размерность функции.

Можно выделить шаги функции — геометрические и хронологические. Геометрические шаги (рис. 43) измеряются отрезками абсцисс между точками перегиба.

3.3. S-функция развития

Рассмотрим необходимые и достаточные условия функции вида $L/(a + e^{-\beta t})$, чтобы она могла быть названа S-функцией развития.

Определение 1.

Отображение $y: [0, +\infty) \rightarrow (-\infty, +\infty)$ называется S-функцией, если:

- 1) $y(t) \geq 0$ для любого $t \geq 0$;
- 2) $y(t)$ монотонно возрастает;
- 3) существует $y(\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) < +\infty$;
- 4) график функции $y(t)$ имеет одну точку перегиба с абсциссой из $(0, +\infty)$.

З а м е ч а н и е 1. Как следует из свойств 2) и 3),

$$y(0) < y(t) < y(+\infty) \quad \text{для } t \in (0, +\infty).$$

З а м е ч а н и е 2. В дальнейшем будем полагать, что $y(t) \in C^4(0, +\infty)$ за исключением, быть может, точки $t=t_0$, такой, что $(t_0, y(t_0))$ — есть точка перегиба графика функции $y(t)$.

Лемма 1.

Функция

$$y = L/(a + e^{be^{-\beta t}})$$

удовлетворяет условиям 1), 2) и 3) определения 1 в том и только в том случае, если $Lb\beta > 0$ и, кроме того, выполнено одно из трех условий:

- а) $L > 0, b > 0, \beta > 0, a > -1$;
- б) $L > 0, b < 0, \beta < 0, a > 0$;
- в) $L < 0, b < 0, \beta > 0, a < -1$.

Доказательство.

Необходимость:

Так как $y(t)$ монотонно возрастает, то

$$\begin{aligned} 0 < y'(t) &= \left\{ L/(a + e^{be^{-\beta t}}) \right\}' = (-1) L/(a + e^{be^{-\beta t}})^2 e^{be^{-\beta t}} (-\beta) = \\ &= Lb\beta e^{-\beta t} e^{be^{-\beta t}} / (a + e^{be^{-\beta t}})^2, \end{aligned}$$

откуда следует, что $Lb\beta > 0$.

Найдем $y(+\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} y(t)$.

Пусть $t \rightarrow \infty$, тогда:

1. При $b > 0, \beta > 0$ имеем

$$e^{-\beta t} \rightarrow 0; \quad e^{be^{-\beta t}} \rightarrow 1;$$

$$L/(a + e^{be^{-\beta t}}) \rightarrow L/(a + 1).$$

2. При $b < 0, \beta > 0$ имеем

$$e^{-\beta t} \rightarrow 0; \quad e^{be^{-\beta t}} \rightarrow 1;$$

$$L/(a + e^{be^{-\beta t}}) \rightarrow L/(a + 1).$$

3. При $b > 0$, $\beta < 0$ имеем

$$e^{-\beta t} \rightarrow +\infty; e^{be^{-\beta t}} \rightarrow +\infty;$$

$$L/(a + e^{be^{-\beta t}}) \rightarrow 0.$$

4. При $b < 0$, $\beta < 0$ имеем

$$e^{-\beta t} \rightarrow +\infty; e^{be^{-\beta t}} \rightarrow 0;$$

$$L/(a + e^{be^{-\beta t}}) \rightarrow L/a.$$

Установим, при каких условиях выполняется неравенство:

$$0 < y(0) = L/(a + e^b) < y(+\infty).$$

1. При $L > 0$; $b > 0$; $\beta > 0$ имеем

$$0 < L/(a + e^b) < L/(a + 1),$$

отсюда

$$a + 1 < a + e^b; a + 1 > 0; a + e^b > 0; a > -1.$$

2. Случай $L > 0$; $b < 0$; $\beta > 0$ невозможен, так как $-Lb\beta > 0$!

3. При $L > 0$; $b < 0$; $\beta < 0$ имеем

$$0 < L/(a + e^b) < L/a,$$

откуда

$$a > 0; a + e^b > 0;$$

$$a < a + e^b,$$

и тем самым

$$a > 0.$$

4. Случай $L < 0$; $b > 0$; $\beta > 0$ невозможен, так как $Lb\beta > 0$!

4'. По этой же причине невозможен случай $L < 0$; $b < 0$; $\beta < 0$.

5. Случай $L < 0$; $b > 0$; $\beta < 0$ невозможен, так как здесь $L/(a + e^b) < 0$.

6. При $L < 0$; $b < 0$; $\beta > 0$ имеем

$$0 < L/(a + e^b) < L/(a + 1);$$

отсюда

$$a + e^b < a + 1;$$

$$a + e^b < 0; a + 1 < 0; a < -e^b; a < -1.$$

Необходимость леммы доказана, достаточность леммы очевидна.

Теорема I.

Функция $y = L/(a + e^{be^{-\beta t}})$ является S-функцией тогда и только тогда, когда параметры L , a , b и β удовлетворяют одному из следующих трех условий:

1) $L > 0$; $b > 0$; $\beta > 0$; $a > -1$ $e^b(b-1) - a(b+1) > 0$, это S-функция 1-го типа;

2) $L < 0$; $b < 0$; $\beta < 0$; $a > 0$ $e^{-|b|}(-|b|-1) - a(-|b|+1) < 0$, это S-функция 2-го типа, или $\{e^{-|b|}(|b|+1) + a(1-|b|) > 0\}$;

3) $L < 0$; $b < 0$; $\beta > 0$; $a < -1$ $e^{-|b|}(|b|+1) - |a|(1-|b|) > 0$, что представляет собой S-функцию 3-го типа.

Доказательство.

Найдем условия, при которых уравнение $y''(t) = 0$ имеет единственное решение при $t = t_0$ в интервале $(0, +\infty)$ и такое, что $y''(t) > 0$ при $t \in (0, t_0)$ и $y''(t) < 0$ при $t \in (t_0, +\infty)$.

Имеем:

$$\begin{aligned} y''(t) &= [L/(a + e^{be^{-\beta t}})]'' = Lb\beta [e^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t}/(a + e^{be^{-\beta t}})^2] = \\ &= Lb\beta \{(-2)e^{be^{-\beta t}}be^{-\beta t}(-\beta)e^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t}/(a + e^{be^{-\beta t}})^3 + \\ &+ [e^{be^{-\beta t}}be^{-\beta t}(-\beta)e^{-\beta t} + e^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t}(-\beta)]/(a + e^{be^{-\beta t}})^2\} = \\ &= Lb\beta e^{be^{-\beta t}}(-\beta)e^{-\beta t} [(-2)be^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t} + \\ &+ (a + e^{be^{-\beta t}})(be^{-\beta t} + 1)]/(a + e^{be^{-\beta t}})^3 = \\ &= Lb\beta e^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t}(-\beta) (-be^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t} + abe^{-\beta t} + \\ &+ a + e^{be^{-\beta t}})/(a + e^{be^{-\beta t}})^3 = Lb\beta e^{be^{-\beta t}}e^{-\beta t}\beta [e^{be^{-\beta t}}(be^{-\beta t} - 1) - \\ &- a(be^{-\beta t} + 1)]/(a + e^{be^{-\beta t}})^3. \end{aligned}$$

Очевидно, корни уравнения $y''(t) = 0$ совпадают с корнями уравнения

$$g(t) \equiv e^{be^{-\beta t}}(be^{-\beta t} - 1) - a(be^{-\beta t} + 1) = 0.$$

Найдем $g'(t)$. Имеем:

$$\begin{aligned} g'(t) &= e^{be^{-\beta t}}be^{-\beta t}(-\beta)(be^{-\beta t} - 1) + e^{be^{-\beta t}}be^{-\beta t}(-\beta) - abe^{-\beta t}(-\beta) = \\ &= e^{be^{-\beta t}}(-b^2\beta)e^{-2\beta t} - ab(-\beta)e^{-\beta t} = e^{-\beta t}(-b\beta)(be^{-\beta t}be^{-\beta t} - a). \end{aligned}$$

Пусть выполнено условие а) $L > 0$; $b > 0$; $\beta > 0$; $a > -1$. В этом случае

$$\text{sign } y'' = \text{sign } g(t)$$

и

$$g(0) = e^b(b-1) - a(b+1) > 0;$$

$$g(+\infty) = -1 - a < 0.$$

Так как уравнение $g'(t) = 0$, очевидно, имеет не более одного корня, то уравнение $g(t) = 0$ имеет единственное решение. Здесь

имеет место одна из графических интерпретаций, представленных на рис. 43.

Пусть теперь выполнено условие б) $L > 0$; $b < 0$; $\beta < 0$; $a > 0$. В этом случае

$$\text{sign } y'' = \text{sign } \beta g(t) / (a + e^{be-\beta t})^{-3},$$

а так как $a + e^{be-\beta t} > 0$ и $\beta < 0$, то

$$g(0) = e^{-|b|} (-|b| - 1) - a(-|b| + 1) < 0,$$

а

$$g(+\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} g(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} [e^{-|b|e^{|\beta|t}} (-|b|e^{|\beta|t} - 1) - a(-|b|e^{|\beta|t} + 1)] = +\infty,$$

так как $e^{|\beta|t} \rightarrow \infty$, а $e^{-|b|e^{|\beta|t}} \rightarrow 0$.

Так как уравнение $g'(t) = 0$, очевидно, имеет не более одного корня, то уравнение $g(t) = 0$ имеет единственное решение (рис. 43, з).

Пусть, наконец, выполнены условия в) $L < 0$; $b < 0$; $\beta > 0$; $a < -1$. В этом случае

$$\text{sign } y''(t) = \text{sign } (a + e^{be-\beta t})^{-3} g(t) = -\text{sign } g(t),$$

а следовательно,

$$g(0) = e^{-|b|} (-|b| - 1) - a(-|b| + 1) < 0$$

и

$$g(+\infty) = -1 - a > 0.$$

И в этом случае, как нетрудно видеть, уравнение $g(t) = 0$ также имеет только один корень.

Определение 1.

Пусть дано множество кривых

$$y_k = L_k / (a_k + e^{b_k e^{-\beta_k t}}); \quad k = 1, \dots, n. \quad (3.17)$$

Будем считать, что эти кривые составляют класс R , если существует единственное $t_0 \in (0, +\infty)$, такое, что при любом k выполняется равенство

$$F(t_0, L_k, a_k, b_k, \beta_k) = 0; \\ [F = e^{be-\beta t - \ln a} (be^{-\beta t} - 1) - (be^{-\beta t} + 1)] \quad (3.18)$$

и выполнено одно из соотношений 1, 2 или 3 теоремы I этого раздела. Медианой семейства S-функций будем называть сумму

$$(1/p) \sum_{i=1}^p f_i(t).$$

Следствие 1. Из доказательства теоремы I следует, что медиана кривых класса R есть S -функция.

Следствие 2. Из непрерывности функции F следует, что если для кривых (3.17) выполняются соотношения (3.18) и для каждой из них существует единственное t_k такое, что

$$F(t_k, L_k, a_k, b_k, \beta_k) = 0,$$

а разности

$$\begin{aligned} |t_i - t_j| & \quad (i = 1, \dots, n) \\ & \quad (j = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

достаточно малы, то медиана таких S -функций также будет S -функцией.

3.4. Метод расчета S -функций развития

Определим параметры полученной динамической модели (3.11) по статистическим данным изменения скорости бумагоделательных машин (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Статистические данные изменения скорости буммашин

Годы	Скорость, м/мин	Годы	Скорость, м/мин
1801—1810	5, 14	1921—1930	365, 365, 300, 300, 300, 300, 300, 225, 400, 360
1811—1820	12	1931—1940	425, 450, 550, 460, 250
1821—1830	15	1941—1950	450, 425, 610, 470, 480, 500
1831—1840	10, 22	1951—1960	575, 525, 450, 530, 530, 575, 550, 620, 650, 650, 655, 650, 610, 650, 650, 650, 655, 650, 655
1841—1850	10	1961—1970	650, 210, 750, 720, 670
1851—1860	10	1971—1984	775, 750, 810, 840, 860, 910, 980, 1000
1861—1870	25, 30, 30, 28		
1871—1880	60		
1881—1890	60, 34, 45, 75, 25, 50, 40		
1891—1900	80, 70, 80, 60, 60, 80		
1901—1910	120, 140, 110, 120, 115, 128, 160		
1911—1920	210, 200, 250, 180, 205, 300, 300, 300		

Рассмотрим вопросы оценки параметров нелинейных моделей. Исходя из статистических данных таблицы, определим параметры L, a, b, β , входящие в формулу (3.11). Общим методом их оценки для этой нелинейной модели является метод наименьших квадратов. Пусть дана некоторая случайная наблюдаемая зависимая переменная $y_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ и неслучайная независимая переменная $t_k (k=1, 2, 3, \dots, n)$. Предположим, что как y_i , так и t_k принимают действительные значения из некоторого конечного и бесконечного интервала.

Проанализируем нелинейную зависимость (модель) $y = \varphi(t, \alpha)$, где α — вектор оцениваемых параметров, т. е.

$$\alpha = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_j \\ a_m \end{pmatrix}.$$

Термин «нелинейная» применительно к модели означает, что она нелинейна по параметрам $\alpha_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$, которые должны быть найдены. По сравнению с линейными моделями в нелинейном случае не только усложняется оценка требуемых параметров, но и значительно затрудняются вычисления и интерпретации доверительных интервалов для этих параметров и проверка гипотез. Для определения оценок параметров следует минимизировать сумму квадратов отклонений опытных данных

$$\sum (\alpha) = \sum_{i=1}^{i=n} [y_i - \varphi(t_i \alpha_i)]^2,$$

где y_i — единичное наблюдение в точке.

Стандартная процедура в этом случае заключается в отыскании производных функций $\sum (\alpha)$ по всем α_i и приравнивании их к нулю. Таким образом, мы получим m уравнений с m неизвестными. В общем случае они оказываются нелинейными, поэтому первоначальная задача оптимизации заключается в определении корней этих уравнений. Она еще более трудна, чем задача оптимизации.

Поскольку для определения корней системы нелинейных уравнений все равно приходится использовать некоторую итерационную процедуру, то проще применить итерационные методы непосредственно для выявления минимума функции $\sum (\alpha)$. К ним относятся методы прямого поиска, симплексный метод Гусса—Зейделя и Маркуорда. Любой из данных методов минимизации суммы квадратов отклонений от опытных данных может не обнаружить абсолютного минимума из-за неверных начальных предположений о параметрах α_i и неограниченности функции $\varphi(t, \alpha)$. Существуют также дополнительные трудности, которые могут проявиться либо вместе, либо по отдельности. К ним относятся неверный выбор масштаба, взаимодействие параметров, а также эффект пуля. Некоторые классы нелинейных моделей можно преобразовать в линейные формы и рассматривать их с помощью методов линейного анализа.

Оценим теперь параметры модели, когда имеются ограничения. Для этой процедуры при ограничении параметров модели в форме неравенства можно применять методы, основанные на использовании множителей Лагранжа. Такая задача является весьма общей для нелинейного программирования. Ее постановка состоит

в минимизации функции $\sum (\alpha)$ при l ограничениях — равенствах $h_i(\alpha) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, l$) и j ограничениях — неравенствах $g_i(\alpha) > 0$, $i = l+1, \dots, p$; $p = (l+1) = f$.

Чтобы использовать множители Лагранжа, необходимо ограничения типа неравенств преобразовать в ограничения типа равенств. В этом случае функцию Лагранжа можно записать в виде

$$p(\alpha, \lambda) = \sum (\alpha) + \sum_{i=1}^{l} \lambda_i h_i(\alpha) + \sum_{i=l+1}^p \lambda_i [g_i(\alpha) - V_i^2],$$

где вектор λ есть

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_p \end{pmatrix},$$

а V_i^2 ($i = l+1, \dots, p$) — некоторый положительный параметр, определяемый уравнением $g_i(\alpha) - V_i^2 = 0$. Здесь λ_i — неотрицательные и независимые от α весовые коэффициенты, которые можно отождествлять с множителями Лагранжа.

Для того чтобы вектор α^* был решением общей задачи нелинейного программирования, необходимо и достаточно, чтобы:

- 1) функция $\sum (\alpha)$ была выпуклой;
- 2) в окрестности точки α^* функции $\eta_i(\alpha)$ ($i = 1, \dots, l$), $g_i(\alpha)$ ($i = l+1, \dots, p$) были выпуклыми;
- 3) в точке α^* удовлетворялась следующая система уравнений:

$$\partial p(\alpha^*) / \partial \alpha_i = 0 \quad (i = 1, \dots, m);$$

$$\partial p(\alpha^*) / \partial \lambda_i = 0 \quad (i = 1, \dots, p);$$

$$\partial p(\alpha^*) / \partial v_i = 0 \quad (i = l+1, \dots, p);$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, p).$$

Известно [63], что функция $\Phi[x]$ называется выпуклой в области R , если для любых двух векторов x_1 и $x_2 \in R$ выполняется условие

$$\Phi[\theta x_1 + (1 - \theta) x_2] \leq \theta \Phi[x_1] + (1 - \theta) \Phi[x_2],$$

где θ — скаляр, изменяющийся в промежутке $(0, 1)$.

Таким образом, условие минимума имеет место в стационарной точке для $p(\alpha, \lambda, V)$ и, в частности, в седловой точке (α, λ, V) пространства. В нашей конкретной задаче

$$\sum (\alpha) = \sum (L, a, b, \beta) = \sum_{i=1}^M [y_i - L / (a + e^{b e^{-\beta t_i}})]^2; \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} p &\equiv p(L, a, b, \beta, \lambda_1, V_1, \lambda_2, V_2) = \\ &= \sum (L, a, b, \beta) + \lambda_1 (L - V_1^2) + \lambda_2 (a - V_2^2). \end{aligned} \quad (3.20)$$

Громоздкость функции (3.19) приводит к чрезвычайно сложным вычислениям, поэтому иногда имеет смысл воспользоваться приближенным методом вычисления параметров L , a , b , β , основанным на минимизации функции лишь по параметрам b и β .

Проведем ее, например, для S-функций первого типа. Введем обозначения:

$$\bar{m} = \min \{y_i\}; \quad \bar{M} = \max \{y_i\},$$

где $\{y_i\}$ — имеющаяся в нашем распоряжении статистическая совокупность.

Если совокупность содержит бесконечное число членов, то под m и M будем понимать соответственно \inf и \sup этого множества.

Приведем наше уравнение к виду

$$L/y - a = e^{be - \beta t}$$

и после логарифмирования получим

$$\ln(L/y - a) = be^{-\beta t}. \quad (3.21)$$

Прологарифмируем теперь выражение (3.21). Это возможно лишь в случае $b > 0$. В результате логарифмирования получим

$$\ln \ln(L/y - a) = \ln b - \beta t. \quad (3.22)$$

Выберем параметры L и a . Так как для всех S-функций первого типа правая часть формулы (3.21) положительна, то выражение, стоящее под логарифмом в левой части этой формулы, должно быть больше 1 для всех y из рассматриваемой статистической совокупности, т. е.

$$L/(y_i - a) > 1 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (3.23)$$

или

$$L/(a + 1) > y_i \quad (i = 1, \dots, m). \quad (3.24)$$

Из (3.23) и (3.24) следует, что параметры L и a должны быть выбраны так, чтобы

$$L/(a + 1) > \bar{M} = \max \{y_i\}. \quad (3.25)$$

Зафиксируем параметры L_0 и a_0 , удовлетворяющие соотношению (3.25), и введем следующее обозначение:

$$Y_i = \ln [\ln (L_0/y_i - a_0)].$$

Составим сумму

$$p(b, \beta) = \sum_{i=1}^m (Y_i - \ln b + \beta t_i)^2. \quad (3.26)$$

Задача сводится к нахождению минимума этой функции двух переменных. Находим стационарную точку этой функции. Для

этого дифференцируем функцию по параметрам b и β и приравняем производные к нулю:

$$\left. \begin{aligned} \partial p / \partial b &= -(2/b) \sum_{i=1}^m (Y_i - \ln b + \beta t_i) = 0; \\ \partial p / \partial \beta &= 2 \sum_{i=1}^m t_i (Y_i - \ln b + \beta t_i) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Таким образом, задача сводится к решению двух уравнений с двумя неизвестными $\ln b$ и β :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m (Y_i - \ln b + \beta t_i) &= 0; \\ \sum_{i=1}^m t_i (Y_i - \ln b + \beta t_i) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Можно рассматривать функцию

$$\begin{aligned} p(b, \beta, V, \lambda_1, V_1, \lambda_2) &= \sum_{i=1}^m (Y_i - \ln b + \beta t_i)^2 + \\ &+ \lambda_1 (\beta - V^2) + \lambda_2 (b - V_1). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Здесь положительность β , как следует из изложенного ранее, автоматически ведет к положительности параметра b . Однако если мы остановимся лишь на случае $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$, то опять придем к системе (3.28).

Возвращаясь к этой системе, введем обозначения:

- 1) $\sum_{i=1}^m Y_i = Q_1$;
- 2) $\sum_{i=1}^m t_i = Q_2$;
- 3) $\sum_{i=1}^m t_i Y_i = Q_3$;
- 4) $\sum_{i=1}^m t_i^2 = Q_4$.

Так как L_0 и a_0 — фиксированы, то Q_i ($i=1, \dots, 4$) — конкретные постоянные для данной статистической совокупности $\{y_i\}$. Система (3.28) запишется в виде

$$\begin{aligned} -\ln b + \beta Q_2 + Q_1 &= 0; \\ -Q_2 \ln b + \beta Q_4 + Q_3 &= 0. \end{aligned}$$

Это система двух уравнений с двумя неизвестными. Решая ее, получаем:

$$\beta_0 = (Q_2 Q_1 - Q_3) / (Q_4 - Q_2^2); \quad (3.30)$$

$$\ln b_0 = (Q_2 Q_1 - Q_3) Q_2 / (Q_4 - Q_2^2) + Q_1. \quad (3.31)$$

Предположим вначале, что величина β , вычисленная по формуле (3.30), положительна. Вычислим вторые производные от функции $p(\beta, b)$ по параметрам b и β и обозначим

$$\left. \frac{\partial^2 p(\beta, b)}{\partial \beta^2} \right|_{\substack{\beta=\beta_0 \\ b=b_0}} = R_1, \quad (3.32)$$

$$\left. \frac{\partial^2 p(\beta, b)}{\partial \beta \partial b} \right|_{\substack{\beta=\beta_0 \\ b=b_0}} = R_2; \quad (3.33)$$

$$\left. \frac{\partial^2 p(\beta, b)}{\partial b^2} \right|_{\substack{\beta=\beta_0 \\ b=b_0}} = R_3. \quad (3.34)$$

Рассмотрим квадратичную форму переменных W_1 и W_2 :

$$R_1 W_1^2 + 2R_2 W_1 W_2 + R_3 W_2^2 = \bar{F}(W_1, W_2).$$

Известно [56], что если выполняются условия Сильвестра:

1) $R_1 > 0$;

2) $R_2 > 0$;

3) $\begin{vmatrix} R_1 & R_2 \\ R_2 & R_3 \end{vmatrix} = R_1 R_3 - R_2^2 > 0$,

то функция (3.29) имеет минимум при b и β , вычисленных по формулам (3.30) и (3.31).

Из приведенного следует теорема.

Теорема II.

Пусть параметры L_0 и a_0 выбраны так, чтобы

1) $L_0/(a_0 + 1) > \bar{M} = \max \{y_i\}$;

$L_0 > 0$;

$a_0 > -1$;

2) $(Q_2 Q_1 - Q_3)/(Q_4 - Q_2^2) > 0$;

3) $R_1 > 0$, $R_2 > 0$, $R_1 R_3 - R_2^2 > 0$;

4) $e^{b_0}(b_0 - 1) - a_0(b_0 + 1) > 0$;

$[\ln b_0 = (Q_2 Q_1 - Q_3) Q_2 / (Q_4 - Q_2^2) + Q_1]$.

Тогда наша статистическая совокупность $\{y_i\}$ описывается S-функцией первого типа, для которой положительные параметры b_0 и β_0 вычисляются по формулам (3.30) и (3.31), дающим минимум функции $S(b, \beta)$.

На практике поступают следующим образом. Если не выполнено только условие 3) теоремы, то для описания совокупности по-прежнему берется S-функция первого типа с параметрами a_0 , L_0 , β_0 (3.30) и b_0 (3.31), несмотря на то что два последующих параметра уже не минимизируют функцию $S(b, \beta)$.

Если выполняется неравенство

$$(Q_2 Q_1 - Q_3)/(Q_4 - Q_2^2) < 0 \quad (3.35)$$

или равенство

$$Q_4 = Q_2^2, \quad (3.36)$$

то необходимо либо увеличить информацию $\{y_i\}$, либо рассмотреть новые варианты L_0 и a_0 .

Если по-прежнему будем иметь (3.35) или (3.36), это практически будет означать, что нашу статистическую совокупность нельзя описать S-функциями первого типа.

Вычислительная процедура для S-функций

Здесь будет указан способ нахождения параметров L , a , b , β S-функции

$$y(t) = L/(a + e^{be^{-\beta t}}),$$

при которых достигается минимум функции

$$\bar{\Phi}(L, a, b, \beta) = \sum_{i=1}^n [y_i - L/(a + e^{be^{-\beta t_i}})]^2. \quad (3.37)$$

Здесь $(t_i; y_i)$ ($i=1, \dots, n$) — статистические данные. Согласно ранее данному определению функция (3.11) называется S-функцией первого типа, если выполняются следующие неравенства:

$$L > 0; \quad (3.38)$$

$$b > 0; \quad (3.39)$$

$$\beta > 0; \quad (3.40)$$

$$-1 < a < +\infty; \quad (3.41)$$

$$e^b(b-1) - a(b+1) > 0. \quad (3.42)$$

Для реализации способа необходимы лишь следующие начальные данные:

$$M_1 > y'(0); \quad (3.43)$$

$$M_2 > y(0) > M_3, \quad (3.44)$$

т. е. при $t=0$ необходимы лишь ограничения на саму функцию и ее производную. Ограничение (3.43) нетрудно ввести из графических соображений, а ограничение (3.44) — из практических и физических.

Реализация указанного способа позволит, как будет видно в дальнейшем, с любой степенью точности выразить

$$y(+\infty) = L/(a+1) \quad (3.45)$$

через начальные константы M_1 , M_2 , M_3 . Из соотношения (3.42) имеем

$$a < e^b(b-1)/(b+1). \quad (3.46)$$

Из соотношений (3.39) и (3.46) имеем

$$a + e^b < e^b [(b-1)/(b+1) + 1] < e^b 2b/(b+1). \quad (3.47)$$

Так как

$$y(0) = L/(a + e^b); \quad (3.48)$$

$$y'(0) = Lb\beta e^b/(a + e^b)^2, \quad (3.49)$$

то из соотношений (3.43), (3.44), (3.47) имеем

$$\begin{aligned} M_1 > y'(0) &= Lb\beta e^b/(a + e^b)^2 > M_3 b e^b \beta / (a + e^b) > \\ &> M_3 b e^b / [e^b 2b/(b+1)] \beta = M_3 (b+1) \beta / 2 > M_3 \beta / 2. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Итак:

$$M_1 > M_3 \beta / 2. \quad (3.51)$$

Из соотношения (3.51) получаем

$$0 < \beta < 2M_1/M_3. \quad (3.52)$$

В дальнейшем промежутке

$$(0; 2M_1/M_3) \quad (3.53)$$

делим на n частей и проводим вычисления, т. е. находим $\min \Phi(L, a, b, \beta)$ при каждом из этих β , а затем берем то, которое дает наименьшее из всех $\Phi(L, a, b, \beta)$.

Здесь мы при каждом из указанных в промежутке (3.53) β ищем минимум функции $\Phi(L, a, b, \beta)$ как функции трех переменных: L, a, b . Из дальнейшего будет видно, что эту задачу мы можем свести к классической задаче на экстремум функции нескольких переменных.

Итак, в соответствии с (3.52) имеем:

$$\beta = x 2M_1/M_3, \quad (3.54)$$

где $x = 1/n, 2/n, \dots, (n-1)/n$.

Из соотношений (3.50) и (3.54) имеем

$$M_1 > M_3 x 2M_1 b e^b / M_3 (a + e^b), \quad (3.55)$$

откуда

$$a + e^b > b e^b x 2,$$

или

$$a > e^b (2bx - 1). \quad (3.56)$$

Но так как для S-функций первого типа

$$e^b (b-1) > a (b+1),$$

то из соотношения (3.56) получаем

$$e^b (b-1) > (2b e^b x - e^b) (b+1);$$

отсюда

$$\begin{aligned}b - 1 &> (2bx - 1)b + 2bx - 1; \\ 2 &> 2bx + 2x\end{aligned}$$

и

$$0 < b < (1 + x)/x < n, \quad (3.57)$$

так как $x = 1/n, \dots, (n - 1)/n$.

Укажем теперь границы для параметра a . По условию имеем

$$a < e^b (b - 1)/(b + 1). \quad (3.58)$$

Рассмотрим функцию

$$f(b) = (b - 1)/(b + 1) \quad (3.59)$$

на промежутке $(0, +\infty)$.

Так как

$$f(0) = -1; \quad (3.60)$$

$$f(+\infty) = +1, \quad (3.61)$$

а

$$f'(b) = [(b + 1) - (b - 1)]/(b + 1)^2 > 0, \quad (3.62)$$

то

$$-1 < a < e^b < e^n. \quad (3.63)$$

Граница для параметра L может быть получена легко:

$$y(0) = L/(a + e^b) < M_2.$$

Отсюда из соотношения (3.63) следует:

$$L < M_2(a + e^b) < 2M_2e^n. \quad (3.64)$$

Кроме того,

$$M_3 < y(0) = L/(a + e^b) < L/(-1 + e^b).$$

Отсюда и из (3.57) следует

$$L > M_3(e^3 - 1). \quad (3.65)$$

Выписываем отдельно соотношения (3.52), (3.57), (3.63), (3.64), (3.65):

$$0 < \beta < 2M_1/M_3; \quad \beta = 2M_1/(nM_3), \dots, 2M_1(n - 1)/n;$$

$$0 < b < n; \quad -1 < a < e^n; \quad M_3(e^n - 1) < L < 2M_2e^n.$$

Получение этих оценок является, пожалуй, основным достижением рассмотренного способа нахождения параметров L, a, b, β S-функции первого типа.

Далее рассматриваем функции

$$\Phi[L; a; b; 2M_1/(nM_3)]; \quad (3.66)$$

$$\Phi[L; a; b; 2M_1(n - 1)/n], \quad (3.67)$$

каждая из которых зависит от трех переменных: L , a и b . Найдем наименьшее значение каждой из них на замкнутом множестве¹

$$(*) \begin{cases} 0 \leq b \leq n; \\ -1 \leq a \leq e^n; \\ M_3(e^n - 1) < L < 2M_2e^n. \end{cases}$$

Пусть

$$L_1^0, a_1^0, b_1^0, \\ L_n^0, a_n^0, b_n^0$$

— те значения из множества $(*)$, в которых принимают наименьшие значения соответственно функции (3.66), ..., (3.67). Теперь остается из n чисел

$$\Phi[L_1^0, a_1^0, b_1^0, 2M_1/(nM_3)]; \\ \Phi\{L_n^0, a_n^0, b_n^0, 2M_1n/[M_3(n-1)]\}$$

выбрать наименьшее.

Пусть, например, наименьшим является число

$$\Phi[L_1^0, a_1^0, b_1^0, 2M_1/(nM_3)].$$

Будем рассматривать S -функцию первого типа с соответствующими параметрами

$$y(t) = L_1^0 / (a_1^0 + e^{b_1^0 t - 2M_1 t / (nM_3)}).$$

В этом случае, как нетрудно видеть,

$$y(+\infty) = L_1^0 / (a_1^0 + 1); \\ [y(t) < L_1^0 / (a_1^0 + 1) \text{ при } t \in (0, +\infty)].$$

Таким образом, в рассматриваемом случае верхняя граница S -функции (т. е. числа L_1^0 и a_1^0) может быть получена средствами классического анализа с применением ЭВМ, причем для получения чисел достаточно знать лишь начальные ограничения: M_1 , M_2 , M_3 .

Метод приближенного вычисления S -функций второго типа

Рассмотрим способ нахождения параметров L , a , b , β функций

$$y(t) = L / (a + e^{be^{-\beta t}}),$$

¹ По известной теореме Вейерштрасса, каждая из этих функций имеет наименьшее значение на множестве $(*)$; вычисление с помощью ЭЦВМ можно провести без особого труда.

при которых достигается минимум y функции

$$\Phi(L, a, b, \beta) = \sum_{i=1}^n [y_i - L/(a + e^{be^{-\beta t_i}})]^2. \quad (3.68)$$

Здесь (t_i, y_i) ($i=1, \dots, n$) — статистические данные. Предположим, кроме того, что выполняются условия:

$$L < 0; \quad (3.69)$$

$$b < 0; \quad (3.70)$$

$$\beta < 0; \quad (3.71)$$

$$a > 0; \quad (3.72)$$

$$e^{-|b|}(|b| + 1) + a(1 - |b|) > 0. \quad (3.73)$$

Для реализации этого метода необходимы следующие ограничения:

$$M_1 > y'(0) > 0, \quad (3.74)$$

полученные из графических соображений, а также

$$M_2 > y(0) > M_3; \quad (3.75)$$

$$M_4 > \dot{y}(\infty) > M_5, \quad (3.76)$$

полученные из практических и физических соображений.

Замечания об ограничении (3.76). 1. При рассуждениях глобального характера, т. е. являющихся общими для любых технических систем, $\max y(+\infty)$ следует брать меньшим или равным c — скорости света, так как иные значения не имеют физического смысла.

2. При рассуждениях, связанных с функционированием конкретных технических систем или с производством конкретного продукта, можно считать, что $\max y(+\infty) < 70$ км/с, так как превышение этого условия также не является реальным.

Таким образом, реализуя приближенный метод для S-функции второго типа, имеем:

$$y'(0) = Lb\beta e^b/(a + e^b)^2; \quad (3.77)$$

$$y(0) = L/(a + e^b); \quad (3.78)$$

$$y(\infty) = L/a. \quad (3.79)$$

Поскольку $\beta < 0$, из соотношений (3.70), (3.75), (3.76), (3.78), (3.79) имеем:

$$M_2 > L/(a + e^{-|b|}) > M_3;$$

$$M_4 > L/a > M_5;$$

отсюда

$$M_4/M_3 > (a + e^{-|b|})/a > M_5/M_2; \quad (3.80)$$

получаем

$$a(M_4/M_3 - 1) > e^{-|b|} > a(M_5/M_2 - 1),$$

или

$$a < M_2 e^{-|b|} / (M_5 - M_2) < M_2 / (M_5 - M_2). \quad (3.81)$$

Из соотношений (3.70), (3.71), (3.77), (3.78), (3.81) имеем:

$$\begin{aligned} M_1 > L |b\beta| e^{-|b|} / (a + e^{-|b|})^2 > M_3 |b\beta| e^{-|b|} / (a + e^{-|b|}) > \\ > M_3 |b\beta| e^{-|b|} / (M_2 e^{-|b|} / M_5) > M_3 M_5 |b\beta| / M_2. \end{aligned} \quad (3.82)$$

Из соотношения (3.82) получаем

$$|b\beta| < M_1 M_2 / (M_3 M_5). \quad (3.83)$$

Для нахождения наименьшего значения рассматриваемой функции делим отрезок

$$[0, M_2 / (M_5 - M_2)] \quad (3.84)$$

на n равных частей и, придавая параметру a значения:

$$M_2 / [n(M_5 - M_2)], 2M_2 / [n(M_5 - M_2)], \dots, (n-1)M_2 / [n(M_5 - M_2)], \quad (3.85)$$

определяем промежутки изменения параметра b . Для этого фиксируем какое-либо из значений среди чисел (3.85); обозначим его $a_0^{(1)}$. Отсюда, а также из соотношения (3.81) получаем

$$e^{|b|} < M_2 / [(M_5 - M_2) a] \leq M_2 / [(M_5 - M_2) a_0^{(1)}].$$

Итак,

$$e^{|b|} < M_2 / [(M_5 - M_2) a_0^{(1)}], \quad (3.86)$$

отсюда

$$0 < |b| < \ln \{M_2 / [(M_5 - M_2) a_0^{(1)}]\}. \quad (3.87)$$

Разбиваем отрезок

$$\{0, \ln [M_2 / [(M_5 - M_2) a_0^{(1)}]]\} \quad (3.88)$$

на n_1 равных частей:

$$1/n \ln \{M_2 / [(M_5 - M_2) a_0^{(1)}]\}, \dots, (n_1 - 1)/n_1 \ln \{M_2 / [(M_5 - M_2) a_0^{(1)}]\} \quad (3.89)$$

и находим из неравенства (3.83) n значений для параметра $|\beta|$:

$$\begin{aligned} & M_1 M_2 n_1 / \{M_3 M_5 (n_1 - 1) \ln [M_2 / (M_5 - M_2) a_0^{(1)}]\} - \\ & - \delta_0, \dots, M_1 M_2 n_1 / \{M_3 M_5 \ln [M_2 / (M_5 - M_2) a_0^{(1)}]\} - \delta_0. \end{aligned}$$

Здесь постоянная δ_0 выбрана так, чтобы выполнялось неравенство

$$M_1 M_2 n_1 / \{ M_3 M_5 (n_1 - 1) \ln [M_2 / (M_5 - M_2) a_0^{(1)}] \} - \delta_0 > 0.$$

Значения для параметра L находим из неравенства

$$M_4 > L/a > M_5$$

или

$$M_4 a_0^{(1)} > L > M_5 a_0^{(1)},$$

разбив промежутки $[M_4 a_0^{(1)}, M_5 a_0^{(1)}]$ на n_2 равных частей.

Таким образом, на первом этапе имеем $n \times n_1 \times n_1 \times n_2 = k$ — целое число вариантов.

Производим вычисления в каждом из k вариантов с помощью ЭЦВМ, которая устанавливает, в какой из k ситуаций функция

$$\sum_{i=1}^n [y_i - L / (a + e^{b e^{-\beta t_i}})]^2$$

будет наименьшей. Пусть это достигается при следующих значениях параметров:

$$L = L^{(1)}(a_0^{(1)});$$

$$b = b^{(1)}(a_0^{(1)});$$

$$\beta = \beta^{(1)}(a_0^{(1)});$$

$$a = a_0^{(1)}.$$

Эти значения в первом приближении и могут считаться искомыми.

Для получения большей точности берем окрестность точки четырехмерного пространства, т. е. прибавляем при значениях параметров, указанных в (3.89), по шагу и вновь производим подсчет, но уже с более мелким шагом, и т. д., до стабилизации нескольких цифр в каждом из значений L , a , b , β — до создания y значений

$$L = L^{(j)}(a_0^{(1)});$$

$$b = b^{(j)}(a_0^{(1)});$$

$$\beta = \beta^{(j)}(a_0^{(1)}) \quad (3.90)$$

при $j > j_0$ заданного числа цифр после запятой (j_0 — зависит только от этой точности).

Далее рассматриваем значения:

$$L = L^{(k)}(a_0^{(j)});$$

$$b = b^{(k)}(a_0^{(j)});$$

$$\beta = \beta^{(k)}(a_0^{(j)}); \quad (3.91)$$

$$a = a_0^{(j)},$$

где $\bar{j}=1, \dots, n$ и $a_0^{(j)}$ — одно из чисел, указанных в соотношении (3.85), т. е.

$$a_0^{(\bar{j})} = (\bar{j} - 1) M_2 / [\bar{j} (M_5 - M_2)],$$

а $k > k_0$, где k_0 — указанным выше образом характеризует точность решения задачи. Такую точность считаем одинаковой для всех $a_0^{(\bar{j})}$. Остается вычислить функцию (3.68) при значениях четырех параметров L, a, β, b :

$$\left. \begin{array}{l} L^{(j)}(a_0^{(1)}), \dots, \beta^{(j)}(a_0^{(1)}); \\ L^{(k)}(a_0^{(\bar{j})}), \dots, \beta^{(k)}(a_0^{(\bar{j})}); \end{array} \right\} n \text{ строк}$$

$$\bar{j} = 1, \dots, n$$

и выбрать наименьшее.

Вычисление параметров S-функций третьего типа

Для параметров этих функций, как показано выше, справедливы следующие неравенства:

$$L < 0; \quad (3.92)$$

$$b < 0; \quad (3.93)$$

$$\beta > 0; \quad (3.94)$$

$$a < -1; \quad (3.95)$$

$$-|a| + e^{-|b|} < 0; \quad (3.96)$$

$$e^{-|b|} (|b| + 1) - |a| (1 - |b|) > 0. \quad (3.97)$$

Кроме того, предполагаем существование постоянных M_2, M_3, M_4, M_5 , таких, что

$$M_2 > y(0) = L/(a + e^b) > M_3; \quad (3.98)$$

$$M_4 > y(+\infty) = L/(a + 1) > M_5. \quad (3.99)$$

Иными словами, мы воспользовались тем, что для S-функций третьего типа $\beta > 0$; кроме того, в отличие от вычислительной процедуры для S-функций первого и второго типов, здесь не требуется ограничения на $y'(0)$ (что иногда бывает затруднительным).

Не нарушая общности, будем в дальнейшем предполагать

$$M_5 > M_2. \quad (3.100)$$

Например, если выбор M_5 затруднителен, следует положить

$$M_5 = M_2 + \varepsilon,$$

где $\varepsilon > 0$ — весьма малое положительное число.

Из соотношений (3.92), (3.93), (3.95), (3.98), (3.99) следует:

$$M_2 > -|L|(-|a| + e^{-1b|}) > M_3; \quad (3.101)$$

$$M_4 > -|L|(-|a| + 1) > M_5. \quad (3.102)$$

Из неравенств (3.101) и (3.102) получаем

$$M_4/M_3 > (-|a| + e^{-1b|})/(-|a| + 1) > M_5/M_2.$$

Отсюда, а также из (3.95) и (3.96) следует

$$M_5/M_2 < (|a| - e^{-1b|})/(|a| - 1) < |a|/(|a| - 1); \\ (M_5/M_2 - 1)|a| < M_5/M_2.$$

Отсюда и из (3.100)

$$1 < |a| < M_5/(M_5 - M_2). \quad (3.103)$$

Экспериментальные данные, как всегда, обозначим

$$(y_i, t_i) \quad (3.104)$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Введем следующее обозначение:

$$y_n - y_0 = Q_1. \quad (3.105)$$

В дальнейшем под n понимаем наибольшее целое число, при котором

$$Q_1 > 0, \quad (3.106)$$

т. е. экспериментальные данные, для которых $y_n \leq y_0$, мы просто откидываем, — они случайны. Возьмем монотонно возрастающую последовательность чисел

$$R_1, \dots, R_k; \quad (3.107)$$

$$R_1 \geq 1, R_k \rightarrow +\infty \text{ при } k \rightarrow +\infty. \quad (3.108)$$

Зафиксируем R_ρ ($\rho > 1$) — некоторое число этой последовательности.

Предположим вначале

$$||L|/(|a| - e^{-1b|}e^{-\beta t_n}) - |L|/(|a| - e^{-1b|})| > Q_1/R_\rho. \quad (3.109)$$

Число R_ρ характеризует точность нашего вычислительного процесса: чем больше R_ρ , тем точнее дальнейшие рассуждения. (Случай $R_\rho = R_1 = 1$ — идеальный.)

Рассмотрим три случая.

Первый случай.

$$e^{-1b|}e^{-\beta t_n} < Q_1/(2R_\rho M_4)|a|. \quad (3.110)$$

Так как

$$e^{|b|} > e^{|b| e^{-\beta t_n}};$$

$$e^{-|b| e^{-\beta t_n}} > e^{-|b|},$$

то

$$e^{-|b|} < Q_1/(2R_\rho M_4) |a|. \quad (3.111)$$

Имеем

$$\begin{aligned} & \left| |L|/(|a| - e^{-|b| e^{-\beta t_n}}) - |L|/|a| \right| = \\ & = |L| e^{-|b| e^{-\beta t_n}} / [|a| (|a| - e^{-|b| e^{-\beta t_n}})] < \\ & < |L| Q_1 |a| / [|a| 2R_\rho M_4 (|a| - 1)] < Q_1 |L| / [2R_\rho M_4 (|a| - 1)] < \\ & < Q_1 M_4 / (2R_\rho M_4) = Q_1 / (2R_\rho). \end{aligned} \quad (3.112)$$

Здесь мы воспользовались неравенствами (3.102) и (3.110).

Аналогично:

$$\begin{aligned} & \left| |L|/(|a| - e^{-|b|}) - |L|/|a| \right| = |L| e^{-|b|} / [|a| (|a| - e^{-|b|})] < \\ & < |L| Q_1 |a| / [|a| 2R_\rho M_4 (|a| - 1)] = \\ & = Q_1 |L| / [2R_\rho M_4 (|a| - 1)] < Q_1 / (2R_\rho); \end{aligned} \quad (3.113)$$

имеем

$$\begin{aligned} & \left| |L|/(|a| - e^{-|b| e^{-\beta t_n}}) - |L|/(|a| - e^{-|b|}) \right| \leq \\ & \leq \left| |L|/(|a| - e^{-|b| e^{-\beta t_n}}) - |L|/|a| \right| + \\ & + \left| |L|/(|a| - e^{-|b|}) - |L|/|a| \right| < Q_1/(2R_\rho) + Q_1/(2R_\rho) = Q_1/R_\rho. \end{aligned} \quad (3.114)$$

Отсюда и из (3.109) следует, что соотношение (3.110) невозможно.

Второй случай.

$$e^{-|b| e^{-\beta t_n}} > Q_1 |a| / (2R_\rho M_4); \quad (3.115)$$

$$e^{-|b|} < Q_1 |a| / (2R_\rho M_4), \quad (3.116)$$

откуда

$$e^{|b| e^{-\beta t_n}} < 2R_\rho M_4 / (Q_1 |a|) < e^{|b|}. \quad (3.117)$$

Так как

$$1 < |a| < M_5 / (M_5 - M_2),$$

то из (3.116) следует

$$e^{-|b|} < Q_1 |a| / (2R_\rho M_4) < Q_1 M_5 / [2R_\rho M_4 (M_5 - M_2)],$$

или

$$e^{|b|} > 2R_0 M_4 / [Q_1 M_5 (M_5 - M_2)]$$

и

$$|b| > \ln \{2R_0 M_4 / [Q_1 M_5 (M_5 - M_2)]\}. \quad (3.118)$$

Пусть

$$b_1, \dots, b_k \quad (3.119)$$

— убывающая последовательность отрицательных чисел, причем при $b_k \rightarrow -\infty$, $k \rightarrow +\infty$ такая, что

$$|b_1| > \ln 2R_0 M_4 / [Q_1 M_5 (M_5 - M_2)].$$

Зафиксируем число $b_m (m > 1)$ в последовательности (3.119) и рассмотрим те β , для которых в соответствии с неравенством (3.115) выполняется условие

$$e^{|b_m|} e^{-\beta t_n} < 2R_0 M_4 / (Q_1 |a|) < 2R_0 M_4 / Q_1.$$

Для этих β :

$$\begin{aligned} |b_m| e^{-\beta t_n} &< \ln(2R_0 M_4 / Q_1); \\ e^{-\beta t_n} &< (1/|b_m|) \ln(2R_0 M_4 / Q_1); \\ -\beta t_n &< \ln[(1/|b_m|) \ln(2R_0 M_4 / Q_1)]; \\ \beta &> -(1/t_n) \ln[(1/|b_m|) \ln(2R_0 M_4 / Q_1)]. \end{aligned} \quad (3.120)$$

Рассмотрим возрастающую последовательность

$$\beta_1, \dots, \beta_k, \quad (3.121)$$

каждый член которой удовлетворяет неравенству (3.120) ($|b_m|$ всегда можно выбрать так, чтобы при уже фиксированном R_0 в правой части (3.120) стояло положительное число, хотя это и не обязательно, тогда (3.121) — произвольная положительная последовательность).

Находим оценку для L . Учитывая неравенство (3.116), имеем

$$\begin{aligned} M_3 &< |L| / (|a| - e^{-|b|}) < M_2; \\ M_3 (|a| - e^{-|b|}) &< |L| < M_2 (|a| - e^{-|b|}); \\ M_3 [|a| - Q_1 |a| / (2R_0 M_4)] &< |L| < M_2 |a|. \end{aligned} \quad (3.122)$$

Так как

$$1 < |a| < M_5 / (M_5 - M_2),$$

то из (3.122) имеем

$$M_3 \{1 - Q_1 M_5 / [2R_0 M_4 (M_5 - M_2)]\} < |L| < M_2 |a| < M_2 M_5 / (M_5 - M_2). \quad (3.123)$$

В положительном ряду (3.121) зафиксируем натуральное число $\bar{m} > 1$ и рассмотрим промежутки изменения соответственно параметров $|a|$, $|L|$, $|b|$, β :

$$[1, M_3/(M_5 - M_2)]; \quad (3.124)$$

$$\{(1 - (Q_1 M_5 / (2R_\rho M_4)) [M_3 / (M_5 - M_2)]) M_3, M_2 M_5 / (M_5 - M_2)\}; \quad (3.125)$$

$$\{\ln [2R_\rho M_4 / [Q_1 M_5 (M_5 - M_2)]], b_m(R_\rho)\}; \quad (3.126)$$

$$[\beta, (R_\rho, b_m), \beta_{\bar{m}}(R_\rho, b_m)]. \quad (3.127)$$

В обозначении этих открытых промежутков подчеркнуто, что только промежутки изменения параметра $|a|$ (3.124) зависят от исходных ограничений M_5, M_2 ; промежутки же изменения параметра $|L|$ зависят от ранее фиксированного числа R_ρ , характеризующего точность процесса. Промежутки изменения параметра $|b|$ зависят от R_ρ и фиксированного числа с порядковым номером m в ряду (3.119) — $|b_m|$. Промежутки изменения параметра β — от $|b_m|$, R_ρ и числа в ряду (3.121) с порядковым номером \bar{m} .

Пусть

$$M_2 / [(M_5 - M_2) n_1]; \quad (3.128)$$

$$\{M_2 M_5 / (M_5 - M_2) - M_3 [1 - Q_1 M_5^2 / [2R_\rho M_4 (M_5 - M_2)]]\} / n_2; \quad (3.129)$$

$$\{b_m(R_\rho) - \ln [2R_\rho M_4 / [Q_1 M_5 (M_5 - M_2)]]\} / n_3; \quad (3.130)$$

$$[\beta_{\bar{m}}(R_\rho, b_m) - \beta_1(R_\rho, b_m)] / n_4 \quad (3.131)$$

— шаги разбиения промежутков (3.124) и (3.127) на равные части, которых будет соответственно $n_1 - 1, n_2 - 1, n_3 - 1, n_4 - 1$. Здесь n_1, n_2, n_3, n_4 — произвольные натуральные числа больше 1.

В результате указанного разбиения образуется массив $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ чисел. Обозначим его

$$T^{(p); (m, \bar{m})}_{(n_1, n_2, n_3, n_4)}. \quad (3.132)$$

Пусть

$$(|a_{j_1}|, |L_{j_2}|, |b_{j_3}|, \beta_{j_4}) \quad (3.133)$$

— точка в четырехмерном пространстве, координаты которой принадлежат соответствующей строке массива и в которой исследуемая функция

$$\sum_{i=1}^n [y_i - L / (a + e^{be^{-\beta t_i}})]^2 \quad (3.134)$$

принимает наименьшее значение.

На ЭЦВМ вычисляем эту функцию в конечном числе точек $(a, L, b, \beta) - n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4$ и сравниваем их значения. Точку (3.133) в первом приближении и можно считать искомой.

Какова точность такого утверждения? Строго говоря, мы можем утверждать, что наименьшее значение функции (3.134) достигается в точке четырехмерного прямоугольника

$$\Delta^{(j_1, j_2, j_3, j_4)} \quad (3.135)$$

с центром в точке (3.133) и со сторонами, равными шагам (3.128)—(3.131). Отсюда, ограничиваясь лишь точками прямоугольника $\Delta^{(j_1, j_2, j_3, j_4)}$, мы в дальнейшем рассматриваем уменьшенные шаги разделения промежутков (3.124)—(3.127) при больших n_1, n_2, n_3, n_4 . Для еще более точного решения задачи, кроме только что указанного массива

$$T_{(n_1^*, n_2^*, n_3^*, n_4^*)}^{(\rho); (m^*, \bar{m}^*)}, \quad (3.136)$$

где $n_1^* + n_2^* + n_3^* + n_4^* > n_1 + n_2 + n_3 + n_4$, можно рассматривать массивы

$$T_{(n_1^*, n_2^*, n_3^*, n_4^*)}^{(\rho); (m^*, \bar{m}^*)}, \quad (3.137)$$

где $m^* + \bar{m}^* > m + \bar{m}$,
и

$$T_{(n_1^*, n_2^*, n_3^*, n_4^*)}^{(\rho^*); (m^*, \bar{m}^*)}, \quad (3.138)$$

где $\rho^* > \rho$.

Третий случай.

$$e^{-|b|} e^{-\beta t_n} > Q_1 |a| / (2R_\rho M_4); \quad (3.139)$$

$$e^{-|b|} > Q_1 |a| / (2R_\rho M_4). \quad (3.140)$$

Из (3.140) и из оценки для $|a|$ (3.103) имеем

$$e^{-|b|} > Q_1 / (2R_\rho M_4); \quad (3.141)$$

$$e^{|b|} < 2R_\rho M_4 / Q_1;$$

$$0 < |b| < \ln(2R_\rho M_4 / Q_1).$$

Из соотношения (3.139) имеем

$$e^{|b|} e^{-\beta t_n} < 2R_\rho M_4 / Q_1. \quad (3.142)$$

Фиксируя $|b_m|$ из промежутка $(0, \ln 2R_\rho M_4 / Q_1)$, получаем оценку для β , совпадающую с (3.120):

$$\beta > -(1/t_n) \ln [(1/|b_m|) \ln(2R_\rho M_4 / Q_1)].$$

Оценка для параметра L :

$$\begin{aligned} M_3 &< |L|/(|a| - e^{-|b|}) < M_2; \\ M_3(|a| - e^{-|b|}) &< |L| < M_2(|a| - e^{-|b|}); \\ M_3(1 - 1) &< |L| < M_2[M_5/(M_5 - M_2) - Q_1/(2R_\rho M_4)]; \\ 0 &< |L| < M_2[M_5/(M_5 - M_2) - Q_1/(2R_\rho M_4)]. \end{aligned} \quad (3.143)$$

Итак, в третьем случае нужно рассмотреть следующие промежутки изменения параметров $|a|$, $|L|$, $|b|$, β :

$$[1, M_5/(M_5 - M_2)]; \quad (3.144)$$

$$\{0, M_2[M_5/(M_5 - M_2) - Q_1/(2R_\rho M_4)]\}; \quad (3.145)$$

$$[0, \ln(2R_\rho M_4/Q_1)]; \quad (3.146)$$

$$[\beta_1(R_\rho, b_m), \beta_{\bar{m}}(R_\rho, b_m)]. \quad (3.147)$$

Массив $T^{(p)}(m, \bar{m})(n_1, n_2, n_3, n_4)$, точка $|a|$, $|L_{j2}|$, $|b_{j3}|$, β_{in} (3.133) и прямоугольник (3.135) $\Delta^{(j_1, j_2, j_3, j_4)}$ определяются аналогично тому, как это сделано во втором случае.

Замечание. О грубости априорных оценок (3.98) и (3.99). Несмотря на то что постоянные M_2 , M_3 , M_4 , M_5 в ряде процессов могут быть указаны весьма приближенно, это не скажется на приведенном выше вычислительном процессе. Наиболее тонким в этом смысле является неравенство (3.123).

Действительно, нельзя исключить, что выполняется неравенство

$$M_3 > M_2 M_5 / (M_5 - M_2). \quad (3.148)$$

Но тогда при больших M_4 и R_ρ неравенство для $|L|$ (3.123) смысла не имеет. Это должно означать только следующее: если постоянные M_2 , M_3 и M_5 удовлетворяют неравенству (3.148), то данную статистическую совокупность следует описывать теми S-функциями третьего типа, для которых выполняются неравенства (2.158) и (2.159), т. е. когда имеет место третий случай. Для этого случая неравенство (3.143)—аналог неравенства (3.123)—всегда выполняется для достаточно больших M_4 и R_ρ .

Анализ результатов расчета S-функций развития скорости бумагоделательных машин

Используя массив статистических данных, приведенных в разделе 3.4, можно рассчитать параметры S-функций развития скорости бумагоделательных машин.

Рассчитанные на ЭЦВМ ЕС-1020 коэффициенты уравнения (3.11) приведены в табл. 3.2.

Аналитические выражения (3.11) и их графическое изображение на рис. 44 отчетливо выделяют поколения машин и их стадии развития.

Первое поколение имело активный период в 1800—1890 гг., второе — в 1890—1961 гг., а с 1961 г. начался активный период третьего поколения. Активный период предыдущего поколения ограничивается временем появления активного периода у последующего поколения. Существование машин предыдущего поколения продолжается, но темпы их развития значительно ниже темпов развития новых машин. Это свидетельствует о том, что мероприятия по совершенствованию существующих машин старого (предыдущего) поколения будут обеспечивать некоторый рост

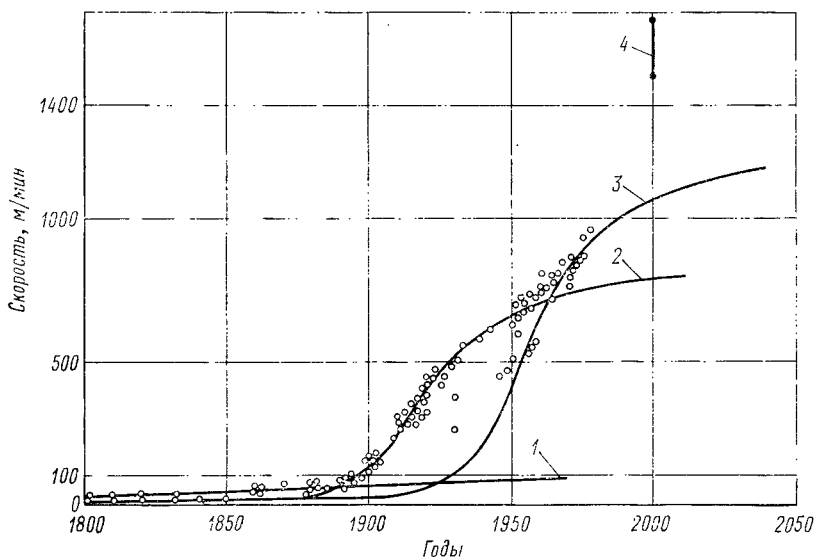


Рис. 44. S-функции развития рабочей скорости бумагоделательных машин для газетной бумаги [11]

1 — первая стадия; 2 — вторая стадия; 3 — третья стадия; 4 — прогноз

производительности, а проделанный анализ позволяет оценить действительные возможности их модернизации. Очевидно, что большого выигрыша в производительности на машинах старого поколения не удастся получить. Причина этому — ограниченные возможности самого способа. Примером может служить результат модернизации бумагоделательных машин фабрики № 1 Балахнинского целлюлозно-бумажного комбината. Одновременно модернизировались машины второго поколения № 1 и № 5 (постройки 1928 г.) и третьего поколения № 6 и № 7 (постройки 1965 г.). Стремление модернизировать старые машины до уровня машин нового поколения привело к установке на них центриклин-

неров для очистки суспензии, закрытых сортировок с гидродинамическими лопастями, дисковых мельниц, закрытого напорного ящика, гидропланок и синтетических сеток. В машинах третьего поколения были установлены гидропланки с синтетическими сетками и твин-прессы. В результате модернизации прирост скорости за 1971—1976 гг. у машин второго поколения был всего 1,5 %, а у машин третьего поколения он увеличился на 8—12 %.

Ветви S-функций нового поколения до активного периода также вещественны. Они объективно отображают возможности того или иного поколения машин. Элементы конструкций нового поколения, как было отмечено в гл. 2, появляются в недрах старого, но эффективность их невелика, они еще не конкурентоспособны с действующими машинами в активном периоде предыдущего поколения. Аппроксимация S-функциями статистических данных изменения скорости бумагоделательных машин третьего поколения позволила установить, что она в 1980 г. равнялась 970 м/мин, в 1990—1060 м/мин, а в 2000 г. составит 1120 м/мин.

Таблица 3.2. Постоянные величины уравнений S-функции скорости бумагоделательных машин

Поколение машин	v	a	b	β
Первое	100	0,2	2,287	0,0192
Второе	800	0,2	2,755	0,0455
Третье	1200	0,2	1,000	0,0500

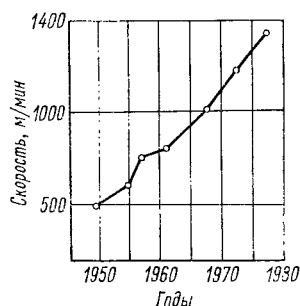


Рис. 45. Изменение скорости бумагоделательных машин для газетных бумаг [75]

На рис. 44 [11] показан прогноз развития скорости бумагоделательных машин для выработки газетной бумаги плотностью 51 г/м². Прогноз явно выпадает из поля точек сопряженного семейства S-функций. Расхождение прогнозов с вероятным значением связано с применением метода экстраполяции при прогнозировании. Например, Г. Штарк [76], прогнозируя на 20—25 лет, основывается только на данных скорости в предыдущем периоде около 20 лет (рис. 45). Этот короткий промежуток с ограниченно малым числом наблюдений создает иллюзию пропорционального развития во времени. Малый интервал времени, принятый для анализа, не позволяет выявить кривизну графика и неравномерность развития скорости. Для достоверности прогнозов необходимо знать искривление S-функции. Поэтому при прогнозировании необходимо, чтобы предшествующий прогнозу период был больше и имел достаточное количество статистических данных, что позволит определить участки S-функции и кривизну ее изменений во времени.

Аналитический прогноз развития скорости бумагоделательных машин значительно расходится с экспертным прогнозом как советских, так и зарубежных специалистов. Научно обоснованный прогноз, показывающий более скромные темпы развития скорости, при всей бесспорности и убедительности все же нуждается в объяснении причин, затормаживающих рост развития бумагоделательных машин на данном этапе. Попытаемся объяснить физическую сущность этих причин.

Реализуемый бумагоделательными машинами технологический метод НВГО при достигнутой интенсификации обезвоживания подходит к пределу своих возможностей по скорости удаления технологической воды из структуры формирующегося и сформованного полотна. Вода, имеющая большие плотность и вязкость, при удалении с большой скоростью (по объему она составляет до 99 %) начинает разрушать структуру полотна, увлекая за собой волокна и наполнители. Поэтому на сеточной части устойчиво достигается обезвоживание не более 23—25 %, на прессовой — не более 43—44 % при обеспечении качественных показателей полотна. Интенсивность удаления внутри- и межволоконной влаги в сушильной части, представляющего собой процесс с большой инерционностью, также сдерживается нарушением качественных показателей полотна при его форсировании.

Отдельные усовершенствования конструкций и впредь будут давать возможность некоторого ускорения процесса удаления технологической воды в пределах, ограниченных аналитическим прогнозом роста скорости бумагоделательных машин. Однако бесспорно, что метод НВГО приближается к пределам своих возможностей. Поэтому все более убедительной становится необходимость замены воды как технологической среды при производстве бумаги другой средой с техническими параметрами по плотности, вязкости и другим показателям, позволяющими преодолеть физический барьер метода НВГО.

3.5. Вычислительная процедура для нахождения активного участка S-функции

Обозначим через \bar{t} решение уравнения $y''(t) = 0$.

Рассмотрим сегмент $[0, \bar{t}]$. Обозначим через A точку на графике функции

$$y = L / (a + e^{be^{-\beta t}})$$

$$(t \in [0, \bar{t}]),$$

для которой функция

$$|k(t)| = |y''(t) / [1 + (y'(t))^2]^{3/2}|$$

достигает наибольшего значения.

Через B обозначим точку, в которой функция $|h(t)|$ достигает наибольшего значения на полусегменте $[\bar{t}, +\infty]$.

Определение II.

Часть графика S -функции, заключенную между точками A и B , будем называть активным участком графика.

Дадим алгоритм нахождения координат точек A и B .

1. Нахождение значения \bar{t} .

В п. 3.3 было установлено:

$$y''(t) = [Lb\beta / (a + e^{be-\beta t})] e^{be-\beta t} e^{-\beta t} \beta [e^{be-\beta t} (be^{-\beta t} - 1) - a (be^{-\beta t} + 1)]$$

и, следовательно, корень уравнения $y''(t) = 0$ совпадает с корнем уравнения

$$e^{be-\beta t} (be^{-\beta t} - 1) - a (be^{-\beta t} + 1) = 0. \quad (3.149)$$

Обозначим

$$z = be^{-\beta t};$$

тогда уравнение (3.149) примет вид

$$e^z (z - 1) - a (z + 1) = 0. \quad (3.150)$$

При $a > 0$ уравнение (3.150) имеет единственный корень $\bar{z} \in [1, 1+a]$. Убедимся в этом. Для этого рассмотрим функцию

$$f(z) = e^z (z - 1) - a (z + 1).$$

Пусть

$$z_1 e^{z_1} = a.$$

Уравнение $ze^z = a$, очевидно, имеет единственное решение $z_1 > 0$, так как функция ze^z монотонно возрастает при $z > 0$: $(ze^z)' = e^z (z+1) > 0$.

На промежутке $(-\infty, z_1)$ функция $f(z)$ отрицательна, так как $f(-\infty) < 0$ и $f'(z) = e^z (z-1) + e^z - a = ze^z - a < 0$.

На промежутке $[0, 1]$ функция $f(z)$ также отрицательна, поскольку $e^z (z-1) < 0$.

На промежутке $(1+a, +\infty)$ функция $f(z)$ положительна, так как $f(1+a) = e^{(1+a)} a - a(a+2) = a[e^{(1+a)} - a - 2] > 0$.

Для проверки неравенства $e^{(1+a)} > a+2$ рассмотрим функцию

$$h(a) = e^{(1+a)} - a - 2.$$

Имеем:

$$h_0 = e - 2 > 0;$$

$$h'(a) = e^{(1+a)} - 1 > 0.$$

Кроме того, для $z \in [1+a, +\infty)$ справедливо неравенство

$$f'(z) = ze^z - a > (1+a)e^{(1+a)} - a > 0.$$

Единственность решения следует из того, что $f(z_1) = e^{z_1}(z_1 - 1) - a(z_1 + 1) = e^{z_1}z_1 - a - e^{z_1} - az_1 = -e^{z_1} - az_1 < 0$, и при $z > z_1$ $f'(z) > 0$, а корень уравнения $f(z) = 0$, очевидно, принадлежит полуотрезку $(z_1, +\infty)$.

При $a < 0$ уравнение (3.150) имеет единственное решение

$$\bar{z} \in [-1, +1].$$

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим функцию

$$f(z) = e^z(z-1) - a(z+1).$$

Если $ze^z + |a| > 0$ всегда, то $f'(z) > 0$

и

$$f(-1) = -2/e < 0; f(+1) = |a|/2 > 0.$$

Если $ze^z + |a| = 0$ имеет решение z_1 , то так как, очевидно, z_1 меньше нуля и

$$f(z_1) = e^{z_1}(z_1 - 1) + |a|(z_1 + 1) = |a|z_1 - e^{z_1} < 0,$$

а

$$f(1) > 0,$$

то уравнение (3.150) имеет единственное решение на сегменте $[z_1, +1]$, а так как

$$f(-1) < 0,$$

то это единственное решение принадлежит также отрезку $[-1, +1]$.

В каждом из рассмотренных выше случаев $a > 0$ и $a < 0$ корень уравнения $f(z) = 0$ может быть найден теперь известными приближенными методами с любой степенью точности.

При $a = 0$ уравнение (3.150) также имеет единственный корень: $z = 1$.

Пусть $z = \bar{z}$ — корень уравнения (3.150). Тогда корень уравнения (3.149) определится по формуле

$$t = -(1/\beta) \ln(\bar{z}/b)$$

и, если

$$z' < \bar{z} < z'',$$

где z' и z'' — значения с избытком и недостатком, полученные в процессе приближенного вычисления корня \bar{z} , то

$$-(1/\beta) \ln(z'/b) < \bar{t} < -(1/\beta) \ln(z''/b),$$

а величина

$$|-(1/\beta) \ln(z'/b) + (1/\beta) \ln(z''/b)| = |(1/\beta) \ln(z''/(z'))|$$

даст оценку погрешности, с которой вычислен корень \bar{t} .

2. Нахождение координат точки A .

Разобьем отрезок $[0, \bar{t}]$ на 2^n частей (где n — некоторое натуральное число) и обозначим точки деления:

$$0 = t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_{2^n} = \bar{t}, (t_{i+1} > t_i).$$

Вычислим значения функции $k(t)$ в каждой точке. Поскольку \bar{t} — единственный корень уравнения $y''(t) = 0$, а на отрезке $[0, \bar{t}]$ имеет место неравенство

$$y''(t) > 0,$$

то $y'(t)$ возрастает и, следовательно, для $t \in [t_i, t_{i+1}]$ при каждом i справедливо неравенство

$$\begin{aligned} A_i &= (\min_{t \in [t_i, t_{i+1}]} y''(t) / \{1 + [y'(t_i)]\}^{3/2} < \\ &< k(t) < \max_{t \in [t_i, t_{i+1}]} y''(t) = B_i; \end{aligned}$$

Будем увеличивать n до тех пор, пока не станет выполняться неравенство

$$\begin{aligned} \max [B_i - A_i] &< \delta/2, \\ 0 &\leq i \leq 2^n, \end{aligned}$$

где δ — требуемая точность, с которой должно быть вычислено наибольшее значение $k(t)$.

После этого выберем среди $k(t_i)$ наибольшее.

Числа A_i и B_i могут быть без труда оценены соответственно «снизу» и «сверху». Например, оценим B_i в случае $L > 0$, $b > 0$, $\beta > 0$, имеем

$$\begin{aligned} B_i &\leq Lb\beta^2 e^{be^{-\beta t_i}} e^{-\beta t_i} [e^{be^{-\beta t_i}} (be^{-\beta t_i} - 1) - \\ &- a (be^{-\beta t_{i+1}} + 1)] / (a + e^{be^{-\beta t_{i+1}}})^3, \end{aligned}$$

так как выражение, стоящее в фигурных скобках соотношения (3.151), положительно;

$$\begin{aligned} y''(t) &= [Lb\beta^2 e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} / (a + e^{be^{-\beta t}})^3] \times \\ &\times \{e^{be^{-\beta t}} (be^{-\beta t} - 1) - a (be^{-\beta t} + 1)\}. \end{aligned} \quad (3.151)$$

Аналогично проводятся оценки и в остальных случаях.

3. Нахождение координат точки B .

Прежде всего опишем последовательность вычислений, с помощью которых можно найти верхнюю границу абсциссы точки B .

1) Найдем точку $t = t_1 \geq \bar{t}$, в которой $y'(t_1) < 1/2$.

Имеем

$$y'(t) = Lb\beta e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} / (a + e^{be^{-\beta t}})^2 < 1/2.$$

В качестве t_1 выберем t , удовлетворяющее неравенству

$$e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} / (a + e^{be^{-\beta t}})^2 < 1/(2Lb\beta);$$

$$e^b e^{-\beta t} / (a + 1)^2 < 1/(2Lb\beta);$$

$$e^{-\beta t} < (a + 1)^2 e^{-b} / (2Lb\beta);$$

$$t > -(1/\beta) \ln [(a + 1)^2 e^{-b} / (2Lb\beta)].$$

Итак, в качестве t можно взять

$$t_1 = -(1/\beta) \ln [(a + 1)^2 e^{-b} / (2Lb\beta)].$$

При $t \geq t_1$ справедливо неравенство

$$|k(t)| = |y''/[1 + (y')^2]^{3/2}| > y''/[1 + 3(y')^2] > |y''|/1,75 > 0,5 |y''|$$

и, следовательно, при $t > t_1$ график функции $y = |k(t)|$ расположен выше графика функции $y = 1/2 |y''|$. Но так как $|k(t)| < |y''|$, то график функции $y = |k(t)|$ расположен ниже графика функции $y = |y''|$.

Таким образом, имеет место изображенная на рис. 42, д графическая зависимость.

2) Найдем точку $t = t_2 \geq t_1$, такую, что $|y''(t_2)| < 0,5 |y''(t_1)|$. Обозначим $M = 0,5 |y''(t_1)|$.

Например, для случая $L > 0$, $b > 0$, $\beta > 0$ найдем t_2 (любое большее t_1), удовлетворяющее неравенству

$$\left| [Lb\beta e^{be^{-\beta t}} \beta / (a + e^{be^{-\beta t}})^3] \{ e^{be^{-\beta t}} (be^{-\beta t} - 1) - a (be^{-\beta t} + 1) \} \right| < M.$$

Для этого найдем точку $t_2 \geq t_1$, удовлетворяющую неравенству

$$Lb\beta^2 e^b e^{-\beta t} [e^b (b - 1) - a] / (a + 1)^3 < M;$$

$$e^{-\beta t} < M (a + 1)^3 / \{ Lb\beta^2 e^b [e^b (b - 1) - a] \};$$

$$t > -(1/\beta) \ln \{ M (a + 1)^3 / \{ Lb\beta^2 e^b [e^b (b - 1) - a] \} \}.$$

Таким образом, в качестве t_2 можно взять

$$t_2 = -(1/\beta) \ln \{ 0,5 |y''(t_1)| (a + 1)^3 / \{ Lb\beta^2 e^b [e^b (b - 1) - a] \} \}.$$

Итак, задача нахождения координат точки B свелась к нахождению значения t , в котором функция $k(t)$ принимает наибольшее значение на конечном промежутке $[t_1, t_2]$:

$$\left[-(1/\beta) \ln [(a + 1)^2 e^{-b} / (2Lb\beta)], -(1/\beta) \ln \{ M (a + 1)^3 / \{ Lb\beta^2 e^b [e^b (b - 1) - a] \} \} \right].$$

Соответствующая вычислительная процедура указана в пункте 2, где находились координаты точки A .

Итак, активный участок S -функций может быть вычислен с любой наперед заданной степенью точности.

3.6. Закономерности развития, обусловленные свойствами S -функций

Рассмотрим явления и процессы, обладающие изменяющейся во времени количественной характеристикой $y(t)$, где $y(t)$ — S -функция вида $L/(a + e^{be^{-\beta t}})$.

На основании свойств S -функций указанного вида устанавливаются эволюционные законы, инвариантные относительно параметров L, a, b, β .

1. *Первый глобальный закон развития* — закон сопряженности фаз эволюции.

Согласно определению, график S -функции имеет единственную точку перегиба, а производная S -функции положительна. Это означает, что при изменении t от нуля до $+\infty$ $y(t)$ изменяется от y_0 до y_n со все более возрастающей скоростью, а затем от y_n до y_∞ скорость роста монотонно убывает.

Следовательно, полный эволюционный период естественным образом может рассматриваться как двухфазная система, первую фазу которой — эволюцию от y_0 до y_n — будем называть восходящей фазой, а вторую — эволюцию от y_n до y_∞ — затухающей.

Первый глобальный закон развития заключается в том, что максимум количественной характеристики затухающей фазы не превышает произведения максимума количественной характеристики восходящей фазы на некоторую абсолютную константу.

Аналитически этот закон записывается так:

$$y_\infty < ky_n, \quad (3.152)$$

где k — есть тотальный инвариант относительно L, a, b и β , допускающий приближенную оценку: $k \approx 2,5$.

Докажем неравенство (3.152). Имеем

$$y_n = y(t_n) = L/(a + e^{be^{-\beta t_n}}) = L/(a + e^z),$$

где $z = be^{-\beta t_n}$, z — решение уравнения

$$a^z = a(z + 1)/(z - 1).$$

Далее:

$$\begin{aligned} y_n &= [L/(a + 1)] [(a + 1)/(a + e^z)] = \\ &= [L/(a + 1)] [e^z(z - 1)/(z + 1) + 1] [e^z(z - 1)/(z + 1) + e^z] = \\ &= [L/(a + 1)] [e^z(z - 1) + z + 1] [e^z(z - 1 + z + 1)] = \\ &= [L/2(a + 1)] (ze^z - e^z + z + 1)/(ze^z). \end{aligned}$$

Пусть вначале либо $b > 0$, либо $b < 0$ и $\beta > 0$. Тогда

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = L/(a+1).$$

Из условия $b > 0$ получаем $z > 0$; из условия $b < 0$, $\beta > 0$ получаем $L < 0$ (так как $Lb\beta > 0$) и, следовательно, $a < -1$. Но тогда из

$$e^z = a(z+1)/(z-1)$$

следует

$$(z+1)/(z-1) < 0,$$

откуда либо $z+1 < 0$, $z-1 > 0$, либо $z+1 > 0$, $z-1 < 0$.

Из 1) следует $z < -1$ и $z > +1$, что невозможно.

Из 2) следует $-1 < z < 1$.

Рассмотрим функцию

$$f(z) = (ze^z - e^z + z + 1)/(ze^z) = 1 - 1/z + e^{-z} + e^{-z}/z.$$

На промежутках $(-1, 0)$ и $(0, +\infty)$ она, очевидно, непрерывна. Кроме того,

$$\lim_{z \rightarrow 0} f(z) = 1.$$

Доопределим функцию $f(z)$ в нуле единицей. Далее:

$$f'(z) = 1/z^2 - e^{-z} - e^{-z}/z - e^{-z}/z^2 = (e^z - z^2 - z - 1)/(e^z z^2).$$

Очевидно, имеем $\lim_{z \rightarrow 0} f'(z) = -1/2$.

Доопределим $f'(z)$ в нуле числом $-1/2$.

Пусть ζ — корень уравнения

$$e^\zeta - \zeta^2 - \zeta - 1 = 0;$$

тогда $f'(z) < 0$ при $z \in [-1, \zeta)$, и $f'(z) > 0$ при $z \in (\zeta, +\infty)$.

Кроме того:

$$f_{(-1)} = 1 + 1 + e - e = 2;$$

$$f_{(+1)} = 2/e;$$

$$f_{(0)} = 1;$$

$$f_{(+\infty)} = 1.$$

Следовательно:

а) При $b > 0$ (т. е. когда $z > 0$)

$$(1/2) y_\infty f(\zeta) < y_n < (1/2) y_\infty \cdot 1; \quad (3.153)$$

б) При $b < 0$, $\beta > 0$ (т. е. когда $-1 < z < 0$)

$$(1/2) y_\infty 2/e < y_n < (1/2) y_\infty \cdot 2;$$

в) Пусть $b < 0$, $\beta < 0$, тогда $L > 0$ и $a > 0$, $y_\infty = L/a$;

$$y_n = (L/a) a / (a + e^z) = y_\infty [e^z (z - 1) / (z + 1)] / \{e^z [(z - 1) + (z + 1)] / (z + 1)\} = y_\infty (z - 1) / (2z),$$

а так как $a > 0$, то из $e^z = a(z + 1) / (z - 1)$ получаем либо $z + 1 > 0$, $z - 1 > 0$, либо $z + 1 < 0$, $z - 1 < 0$.

Из 1) следует $-z > 1$, $z > -1$, т. е. $z > 1$ — что невозможно при $b > 0$.

Из 2) следует $z < -1$. Следовательно, $y_n = (1/2) y_\infty (z - 1) / z$ и $z < -1$.

Обозначим

$$F(z) = (z - 1) / z.$$

Имеем:

$$\lim_{z \rightarrow -1} F(z) = 2;$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} F(z) = 1;$$

$$F'(z) = (1 - 1/z)' = 1/z^2 > 0$$

и, следовательно,

$$y_\infty / 2 < y_n < y_\infty \quad (3.154)$$

Окончательно из (3.153), (3.154) получаем

$$(1/2) y_\infty \min [1, f(\xi)] < y_n < y_\infty,$$

откуда

$$y_\infty < y_n \cdot 2 / \min [1, f(\xi)].$$

Обозначим здесь

$$k = 2 / \min [1, f(\xi)].$$

Отсюда и из выражения y_∞ получаем неравенство (3.152).

Приближенное вычисление числа k . Обозначим:

$$h(\xi) = e^\xi - \xi^2 - \xi - 1.$$

Имеем: $h(2) = e^2 - 4 - 2 - 1 = 7,4 - 7 = 0,4 > 0$; $h(1,7) = e^{1,7} - 2,89 - 1,7 - 1 = 5,5 - 5,59 < 0$.

Так как функция $h(\xi)$ непрерывна на замкнутом промежутке $(1,7; 2)$, то по известной теореме Больцано—Коши получаем $1,7 < \xi < 2$. Так как функция $f(z)$ — монотонная и $f(2) = [7,4(2-1) + 2+1] / (2 \cdot 7,4) \approx 0,7 < 1$, то $k = 2 / \min [1, f(\xi)] = 2 \cdot 14,8 / 10,4 \approx 2,5$.

В некоторых случаях заранее удастся установить знаки a , b и β . Тогда, как видно из доказательства утверждения (3.152), первый глобальный закон удастся уточнить, а именно: справедливы три следующих локальных закона.

Первый локальный закон. Если $b > 0$, то максимум количественной характеристики нисходящей фазы больше двух максимумов восходящей и меньше произведения максимума количественной характеристики восходящей фазы на абсолютную константу k .

Аналитически закон записывается в виде

$$2y_n < y_\infty < ky_n. \quad (3.155)$$

Утверждение (3.155), как нетрудно видеть, следует из соотношения (3.153).

Второй локальный закон. Если $b < 0$, $\beta < 0$, то максимум количественной характеристики затухающей фазы больше максимума количественной характеристики восходящей фазы и меньше произведения числа e на максимум количественной характеристики восходящей фазы.

Аналитически закон записывается в виде

$$y_n < y_\infty < ey_n. \quad (3.156)$$

Утверждение (3.156) очевидно следует из (3.153).

Третий локальный закон. Если $b < 0$, $\beta < 0$, то максимум количественной характеристики затухающей фазы больше максимума количественной характеристики восходящей фазы и меньше двух максимумов количественной характеристики восходящей фазы.

Аналитически закон записывается в виде

$$y_n < y_\infty < 2y_n. \quad (3.157)$$

Утверждение (3.157), как нетрудно видеть, следует из неравенства (3.154). Совершенно ясно, что в случае, когда количественная характеристика $y(t)$ не является S-функцией вида

$$L/(a + e^{be - \beta t}),$$

выполнение первого глобального закона необязательно. С другой стороны, справедливость первого глобального закона указывает на глубокие внутренние связи между восходящей и затухающей фазами эволюции.

Закон имеет большое практическое значение как важный инструмент при прогнозировании. В этом плане представляют интерес и локальные законы.

2. *Второй глобальный закон развития* — закон объективной интенсиности.

Суммарный учет изменения во времени количественной характеристики $y(t)$ рассматриваемого процесса порождает новую количественную характеристику — объемную:

$$\int_0^t y(\tau) d\tau.$$

Определение. Будем считать, что объемная характеристика интенсивна, если выполняется неравенство

$$\int_0^{+\infty} [y_{\infty} - y(t)] dt < +\infty, \quad (3.158)$$

и пассивна в противоположном случае, т. е. в случае, когда интеграл в правой части соотношения (3.158) расходится.

Докажем, что если количественная характеристика является S-функцией вида

$$y(t) = L/(a + e^{be^{-\beta t}}),$$

то объемная характеристика интенсивна.

Действительно, пусть вначале $\beta > 0$. Тогда

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} [y_{\infty} - y(t)] dt &= \int_0^{+\infty} [L/(a+1) - L/(a + e^{be^{-\beta t}})] dt = \\ &= L \int_0^{+\infty} [(e^{be^{-\beta t}} - 1)/[(a+1)(a + e^{be^{-\beta t}})]] dt. \end{aligned}$$

Так как $\beta > 0$, то $e^{-\beta t} \in (0, 1)$ при $t \in (0, +\infty)$, и поэтому выполняется неравенство

$$e^{be^{-\beta t}} - 1 < M(b) b e^{-\beta t},$$

где $M(b)$ — некоторая константа, зависящая от b .

Отсюда, как нетрудно показать,

$$\int_0^{+\infty} [y_{\infty} - y(t)] dt < [bM(b)L/(a+1)] \int_0^{+\infty} [e^{-\beta t}/(a + e^{be^{-\beta t}})] dt < +\infty.$$

Пусть теперь $b < 0$, $\beta < 0$. В этом случае

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} [y_{\infty} - y(t)] dt &< L \int_0^{+\infty} [1/a - 1/(a + e^{be^{-\beta t}})] dt = \\ &= (L/a) \int_0^{+\infty} [e^{be^{-\beta t}}/(a + e^{be^{-\beta t}})] dt < +\infty, \end{aligned}$$

что также нетрудно показать.

Неравенство (3.158) и является аналитическим выражением второго глобального закона, который гласит, что объемная количественная характеристика интенсивна.

Заметим, что объемная характеристика интенсивна не всегда; например, если

$$y(t) = t/(1+t),$$

то $y_{\infty} = 1$ и

$$\int_0^{+\infty} [1 - t/(t+1)] dt = \int_0^{+\infty} dt/(t+1) = \lim_{A \rightarrow +\infty} \ln|t+1| \Big|_0^A = +\infty.$$

Второй глобальный закон важно учитывать при решении технических и экономических вопросов промышленного производства и его планирования.

Для примера рассмотрим объем продукции, производимой бумагоделательной машиной, при условии ее постепенной модернизации.

Пусть $y(t)$ — скорость работы бумагоделательной машины (скорость выхода бумажного полотна), тогда величина $\int_0^t y(\tau) d\tau$ есть количество метров бумаги, произведенное за время t . Величина $\int_0^t y_{\infty} d\tau$ есть количество метров бумаги, произведенное за время t машиной, для которой уже в самом начале была выполнена полная теоретически возможная (на данном этапе развития) модернизация. Тогда факт интенсивности объемной характеристики, т. е. выполнение условия

$$\int_0^{+\infty} [y_{\infty} - y(t)] dt < +\infty,$$

означает, что количество «недоданной» продукции — конечно, даже если время полной теоретически возможной модернизации бесконечно.

3.7. Нахождение параметров S-функций по ограничениям на начальные данные

Рассмотрим метод нахождения параметров при ограничениях на $y(0)$, $y'(0)$, $y''(0)$:

$$M_1 > y(0) > M_2; \quad (3.159)$$

$$M_3 > y'(0) > M_4; \quad (3.160)$$

$$M_5 > y''(0) > M_6. \quad (3.161)$$

Существует ряд процессов, в которых эти постоянные могут быть указаны.

Имеем:

$$\begin{aligned} y' &= -L(a + e^{be^{-\beta t}})^{-2} e^{be^{-\beta t}} (-\beta) e^{-\beta t} = \\ &= L\beta (a + e^{be^{-\beta t}})^2 e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t}; \end{aligned} \quad (3.162)$$

$$\begin{aligned} y''(t) &= [L\beta (a + e^{be^{-\beta t}})^{-1}]' = L\beta [(a + e^{be^{-\beta t}})^{-2} e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t}]' = \\ &= L\beta \{(-2)(a + e^{be^{-\beta t}})^{-3} e^{be^{-\beta t}} be^{-\beta t} (-\beta) e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} + \\ &+ (a + e^{be^{-\beta t}})^2 [e^{be^{-\beta t}} be^{-\beta t} (-\beta) e^{-\beta t} + e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} (-\beta)]\} = \\ &= L\beta (a + e^{be^{-\beta t}})^{-3} e^{be^{-\beta t}} (-\beta) e^{-\beta t} \{(-2) be^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} + \\ &+ (a + e^{be^{-\beta t}})(be^{-\beta t} + 1)\} = L\beta (a + e^{be^{-\beta t}})^{-3} e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} (-\beta) \times \\ &\times \{(-b) e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} + abe^{-\beta t} + a + e^{be^{-\beta t}}\} = L\beta (a + e^{be^{-\beta t}})^{-3} \times \\ &\times e^{be^{-\beta t}} e^{-\beta t} \beta \{e^{be^{-\beta t}} (be^{-\beta t} - 1) - a(be^{-\beta t} + 1)\}. \end{aligned} \quad (3.163)$$

Из (3.162) и (3.163) получаем

$$y(0) = L/(a + e^b); \quad (3.164)$$

$$y'(0) = L\beta (a + e^b)^{-2} e^b; \quad (3.165)$$

$$y''(0) = L\beta (a + e^b)^{-3} e^b (-\beta) (-a - e^b - ab + be^b). \quad (3.166)$$

Из соотношений (3.159) и (3.160) имеем

$$M_1/M_4 > y(0)/y'(0) > M_2/M_3. \quad (3.167)$$

Из (3.167), (3.164) и (3.165)

$$M_1/M_4 > (a + e^b)/(b\beta e^b) > M_2/M_3. \quad (3.168)$$

Из (3.159), (3.161), (3.164) и (3.166) имеем

$$M_1/M_6 > y(0)/y''(0) > M_2/M_5.$$

Отсюда

$$M_1/M_6 > (a + e^b)^2/[b\beta^2 e^b (a + e^b + ab - be^b)] > M_2/M_5. \quad (3.169)$$

Кроме того, из (3.168)

$$(M_1/M_4)^2 > (a + e^b)^2/(b\beta e^b)^2 > (M_2/M_3)^2. \quad (3.170)$$

Из соотношений (3.169) и (3.170) получаем

$$A_1 > (a + e^b + ab - be^b)/(be^b) > A_2, \quad (3.171)$$

где

$$A_1 = (M_1/M_4)^2 M_5/M_2; \quad (3.172)$$

$$A_2 = (M_2/M_3)^2 M_6/M_1. \quad (3.173)$$

Из (3.171) имеем

$$A_1 > [(a + e^b)(b + 1) - 2be^b]/(be^b) > A_2. \quad (3.174)$$

$$be^b (A_1 + 2)/(b + 1) > a + e^b > (A_2 + 2) be^b/(b + 1); \quad (3.175)$$

$$e^b [b (A_1 + 1) - 1]/(b + 1) > a > e^b [b (A_2 + 1) - 1]/(b + 1). \quad (3.176)$$

Вновь возвращаемся к исходным неравенствам:

$$M_1 > L/(a + e^b) > M_2; \quad (3.177)$$

$$M_3 > Lb\beta e^b/(a + e^b)^2 > M_4; \quad (3.178)$$

$$M_5 > Lb\beta^2 e^b (a + e^b + ab - be^b)/(a + e^b)^3 > M_6. \quad (3.179)$$

Из соотношений (3.175) и (3.177) получаем

$$M_1 (A_1 + 2) be^b/(b + 1) > L > M_2 (A_2 + 2) be^b/(b + 1). \quad (3.180)$$

Из соотношения (3.175) имеем

$$(b + 1)/(A_1 + 2) < be^b/(a + e^b) < (b + 1)/(A_2 + 2). \quad (3.181)$$

Умножая (3.181) на (3.168), получаем

$$M_2/(b + 1)/[M_3 (A_1 + 2)] < 1/\beta < M_1 (b + 1)/[M_4 (A_2 + 2)].$$

Отсюда

$$M_4 (A_2 + 2)/[M_1 (b + 1)] < \beta < M_3 (A_1 + 2)/[M_2 (b + 1)]. \quad (3.182)$$

Далее фиксируем вещественное число b_0 , которое для определенности будем считать положительным, и пусть $L_0 > 0$, $\beta_0 > 0$, $a_0 > -1$ — параметры, выбранные соответственно в промежутках:

$$[M_2 (A_2 + 2) b_0 e^{b_0}/(b_0 + 1), M_1 (A_1 + 2) b_0 e^{b_0}/(b_0 + 1)]; \quad (3.183)$$

$$[M_4 (A_2 + 2)/[M_1 (b_0 + 1)], M_3 (A_1 + 2)/[M_2 (b_0 + 1)]]; \quad (3.184)$$

$$[e^{b_0} [b_0 (A_2 + 1) - 1]/(b_0 + 1), e^{b_0} [b_0 (A_1 + 1) - 1]/(b_0 + 1)], \quad (3.185)$$

для которых выполняется неравенство

$$e^{b_0} (b_0 - 1) - a_0 (b_0 + 1) > 0.$$

Через $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ обозначили интервалы, содержащие соответственно значения L_0, β_0, a_0 и для которых $L > 0, \beta > 0, a > -1$ и $e^b(b-1) - a(b+1) > 0$. По непрерывности S-функции такие интервалы существуют.¹

Теперь нахождение точки L^*, β^*, a^* , в которой функция

$$\sum_{i=1}^n [y_i - L^* / (a^* + e^{b_0 e^{-\beta^* t_i}})]^2$$

принимает наименьшее значение, производится по такой же схеме, которая была описана выше. Сама же исследуемая кривая будет представлена S-функцией первого типа.

Совершенно аналогично, если бы b_0 фиксировалось отрицательным, была бы возможность выразить кривую S-функциями второго и третьего типов.

¹ Следует особо подчеркнуть, что сами промежутки, учитывая обозначения (3.172) и (3.173), выражены только через заданные ограничения M_1, \dots, M_3 .

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДРУГИХ ВИДОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследования закономерностей развития бумагоделательных машин, проведенные в настоящей монографии, базировались на многолетнем опыте и знаниях автора в этой области. Очевидно, что проводить подобные исследования в других областях техники не представлялось возможным. Поэтому для доказательства адекватности выявленных закономерностей развития другим техническим системам будем пользоваться опубликованными в научной литературе материалами, пригодность которых для аппроксимации их S-функциями является очевидной.

Прежде всего такой обработке можно подвергнуть статистические данные развития других видов целлюлозно-бумажного оборудования как наиболее близкого к бумагоделательным машинам.

4.1. Целлюлозное оборудование

Функциональное назначение целлюлозного оборудования состоит в получении из многокомпонентного растительного сырья — древесины химическим путем природного полимерного материала — целлюлозы. Исходным сырьем для варочных целлюлозных котлов является технологическая щепка, представляющая собой измельченную в виде прямоугольных пластинок на рубительных машинах и очищенную от коры древесину. Сущность процесса заключается в температурной обработке щепы при избыточном давлении в закрытых герметических котлах и растворах бисульфита кальция, магния, натрия или аммония (сульфитный способ) или в среде щелочного раствора едкого натра NaOH и сернистого натрия Na_2S (сульфатный способ). Существуют и другие способы получения целлюлозы или различные их комбинации. Общими для всех способов, реализуемых целлюлозным оборудованием, являются сырье в виде технологической щепы и обработка его химическими реагентами при высоких температуре и давлении.

При сульфитном способе получения целлюлозы применяют котлы периодического действия. Полный технологический цикл котла включает операции загрузки, варки и выгрузки продукции, после чего он повторяется. Повышение производительности этого оборудования, издавна применяемого для получения целлюлозы, достигалось за счет интенсификации операционных процессов, что трудно осуществимо, либо путем увеличения единичной емкости варочных котлов.

Таблица 4.1. Характеристики варочных котлов для сульфитной варки целлюлозы

Год установки	Емкость, м ³	Производительность, т/сут	Год установки	Емкость, м ³	Производительность, т/сут
1898	68	14,5	1937	330	53,4
1904	110	28,4	1939	280	58,5
1906	206	26,5	1940	280	50,1
1910	225	33,9	1946	186	—
1919	213	34,8	1961	320	—
1926	300	—	1961	320	57,3
1927	276	53,4	1962	320	42,0
1929	—	59,4	1964	320	—
1931	300	49,3	1964	270	—
1931	—	43,2	1969	320	66,8
1935	280	60,4	1970	320	—

В табл. 4.1 приведены технические параметры импортированных в СССР и отечественных котлов периодического действия для получения сульфитной целлюлозы, установленных на наших предприятиях с 1898 по 1970 г. Статистический анализ параметров и технико-экономических показателей варочных котлов показывает, что возможности реализуемого ими способа получения целлюлозы достигли предела (рис. 46). За последние 30—35 лет рост их производительности, которая определяется емкостью котла, не превышает 4 % в год. Главной причиной, тормозящей увеличение емкости котлов, является непропорциональное увеличение затрат времени на загрузку и выгрузку по сравнению с продолжительностью самого процесса варки целлюлозы.

Явно выраженная тенденция затухания темпов роста кривой свидетельствует о близости теоретического предела производительности этого способа.

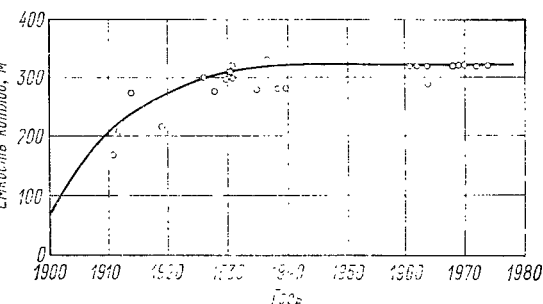


Рис. 46. Емкость котлов для варки целлюлозы сульфитным способом

График рис. 46 может быть описан уравнением S-функции

$$S = 340 / \{0,081 + \exp [0,83 \exp (-0,036t^1)]\},$$

где S — емкость котла, м³.

¹ Здесь и далее $t = t_1 - t_0$, где t — период развития функции, t_0 — год начала развития стадии, t_1 — конечный год исследуемого периода стадии.

Кривая рис. 46 свидетельствует об одностадийности развития варочных котлов периодического действия для сульфитной целлюлозы. По изложенным выше причинам они уступили место более производительным и экономичным варочным котлам, реализующим сульфатный способ производства. Преимущество его заключается в том, что полный технологический цикл котла периодического действия по сравнению с сульфитным способом меньше; это обуславливает повышение суммарной суточной производительности. Кроме того, при реализации сульфатного способа варки целлюлозы

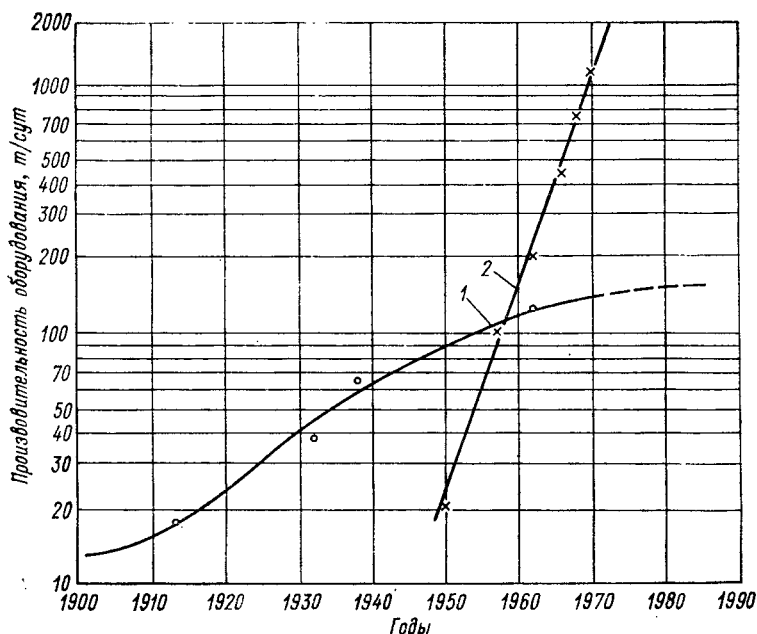


Рис. 47. Рост производительности варочных установок для сульфатной целлюлозы

1 — установки периодического действия; 2 — установки непрерывного действия

оказалось возможным осуществить непрерывный процесс ее изготовления, что по существу революционизировало технологию производства целлюлозы со времени ввода в промышленную эксплуатацию оборудования непрерывной варки. За короткое время этот способ завоевал доминирующую роль в целлюлозно-бумажной промышленности.

На рис. 47 представлены кривые развития производительности варочных котлов для получения целлюлозы сульфатным способом с помощью оборудования периодического и непрерывного действия. Математическая интерпретация статистических данных S-функ-

циями показывает существующие функциональные зависимости:

$$Q = 135 / \{0,078 + \exp [4,23 \exp (-0,046t)]\},$$

где Q — производительность, т/сут (t_0 — 1900 г.).

Кривая 2 рис. 47 иллюстрирует динамику изменения производительности варочных котлов непрерывного действия по данным шведской фирмы «Камюр» [69]. Резкое увеличение производительности котлов за короткий период времени наглядно иллюстрирует преимущество непрерывной варки по сравнению с периодической, темпы которой за последние годы постепенно снижаются. Небольшой период эксплуатации котлов непрерывного действия, немногим превышающий 30 лет, не позволяет установить точки перегиба S-функции, которая интерпретируется уравнением

$$Q = 2100 / \{0,074 + \exp [3,72 \exp (-0,085t)]\},$$

где Q — производительность котлов, т/сут (t_0 — 1950 г.).

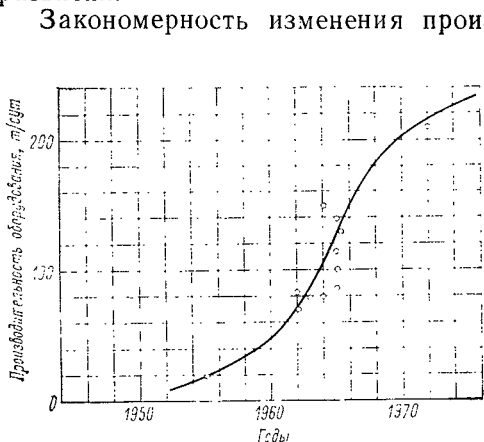
Можно предполагать, что темпы роста производительности этого оборудования в обозримом периоде еще будут сохраняться. Об этом свидетельствуют и значительная модернизация варочных котлов непрерывного действия, в которых за короткий период был введен ряд усовершенствований, таких как механизация процесса выгрузки, включение в технологический процесс режима диффузионной промывки щепы и ее холодной выдувки, внедрение циркуляционных сит, введение эффективных способов очистки питающего щелока в питателях высокого давления, в вихревых очистителях и т. д.

Однако и в этом виде оборудования рост производительности осуществляется путем увеличения объема варочного котла, т. е. за счет роста его диаметра и высоты. В последнее время оба этих фактора оказывают отрицательное влияние на процесс равномерной пропитки щепы и, что особенно важно, приводят к резкому увеличению капитальных затрат, непропорциональному приросту производительности. Особенно это проявляется при установке варочных котлов непрерывного действия в зонах с суровыми климатическими условиями: на севере, северо-западе СССР, а также в Сибири и на Дальнем Востоке, поскольку строительство зданий и сооружений с установкой в них варочных котлов высотой до 120 м приводит к сильному удорожанию основных фондов целлюлозно-бумажных предприятий.

В связи с этим, очевидно, следует ожидать снижения темпов прироста производительности данного вида оборудования, когда влияние регрессивных факторов станет ощутимым в сравнении с выгодой от роста производительности. Косвенным подтверждением грядущей тенденции является изобретение и освоение в промышленности другого вида оборудования для непрерывной варки целлюлозы в виде многотрубных установок. Они позволяют при значительно меньших затратах получать высокую производительность выпуска целлюлозы высокого выхода или полуцеллюлозы различными способами: сульфатным, натронным, сульфитным

и др. Хотя качество получаемой на этом виде оборудования продукции еще не может конкурировать с сульфатной целлюлозой, однако небольшой срок эксплуатации уже свидетельствует о больших потенциальных возможностях этого оборудования (рис. 48).

Небольшой срок существования многотрубных установок, а также малое количество статистических данных говорят еще и о том, что данный вид оборудования находится в первой стадии развития.



Закономерность изменения производительности многотрубных установок для непрерывной варки целлюлозы описывается математической зависимостью

$$Q = 250 / \{0,017 + \exp [3,23 \exp (-0,016t)]\},$$

где Q — производительность установки, т/сут (t_c — 1950 г.).

Аналогичные закономерности изменения производительности оборудования для отбелки целлюлозы различными способами (периодического действия и полунепрерывного — для сульфитной целлюлозы, непрерывного — для сульфатной целлюлозы) приведены на рис. 49:

$$Q = L_i / \{a_i + \exp [b_i \exp (-\beta_i t)]\}, \quad (4.1)$$

где Q — производительность отбельных установок, т/сут (t_1 — 1890 г.; t_2 — 1900 г.; t_3 — 1940 г.; t_4 — 1960 г.).

Постоянные величины уравнения (4.1) даны в табл. 4.2.

Поскольку в целлюлозно-бумажной промышленности оборудование устанавливается в однопоточных технологических линиях,

Таблица 4.2. Коэффициенты уравнения (4.1)

Способ отбелки	Q	a	b	β
Периодическая отбелка сульфитной целлюлозы	125	0,081	2,12	0,038
Полунепрерывная отбелка сульфитной целлюлозы	210	0,092	2,34	0,049
Непрерывная отбелка сульфитной целлюлозы	300	0,061	3,22	0,21
Непрерывная отбелка сульфатной целлюлозы	980	0,071	2,98	0,28

обеспечивающих реализацию непрерывных процессов, то развитие способов варки и рост производительности варочного оборудования вызвали в свою очередь соответствующую интенсификацию процессов отбелки, осуществляемых оборудованием, которое устанавливается в потоках вслед за варочным оборудованием.

На рис. 49 приведены статистические данные, характеризующие производительность отбельных установок, которые не могут быть объединены каким-либо общим методом оценки, поскольку каждая из приведенных кривых соответствует способу, отличному от других. Каждая из кривых, описываемая определенной S-функ-

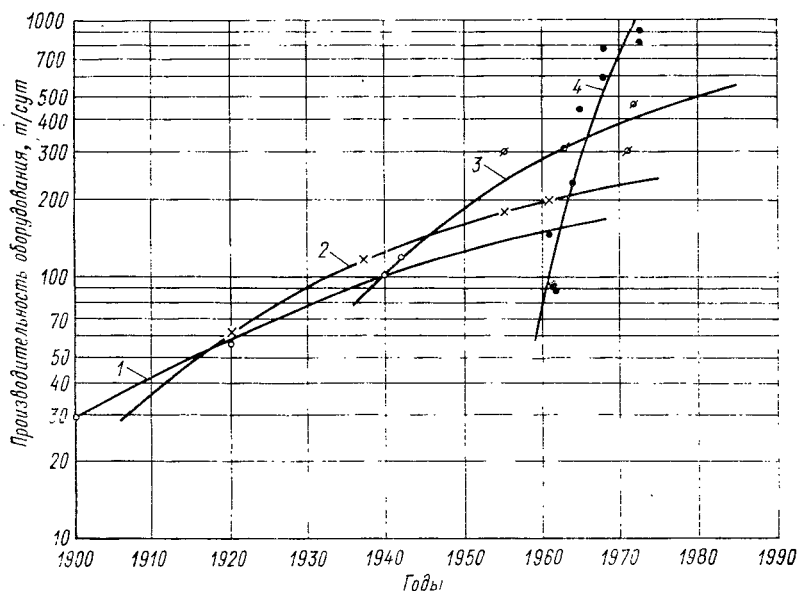


Рис. 49. Рост производительности установок для отбелки целлюлозы

1 — периодического действия для сульфитной целлюлозы; 2 — полупрерывного действия для сульфитной целлюлозы; 3 — непрерывного действия для сульфитной целлюлозы; 4 — непрерывного действия для сульфатной целлюлозы

ций, представляет картину самостоятельного развития того или иного способа. Их характеризует лишь постепенный рост производительности отбельного оборудования.

На рис. 50 показана закономерность изменения удельной производительности пресснатов, установленных в СССР. Эти агрегаты предназначены для отлива и обезвоживания целлюлозы непрерывным способом. Конструкция прессната во многом сходна с конструкцией бумагоделательных машин. Многие усовершенствования нашли отражение и в этом виде оборудования. Однако технические параметры и качественные показатели целлюлозной папки, получаемой на пресснатах, значительно отличаются от

показателей бумаги или картона. Главная же особенность заключается в большой толщине непрерывного полотна целлюлозы, получаемой на пресспатах, что чрезвычайно затрудняет процессы обезвоживания. В связи с этим за весь период существования кон-

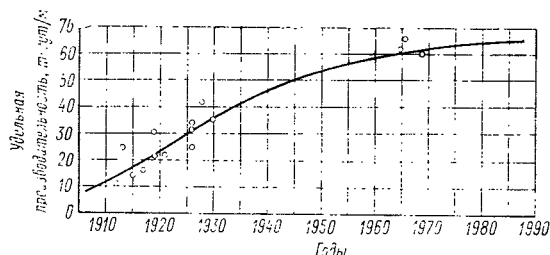


Рис. 50. Удельная производительность пресспатов, установленных в СССР

рукции пресспатов по существу претерпели изменения в пределах лишь одной стадии. Как видно из рис. 50, темпы роста производительности пресспатов в настоящее время значительно снижены, и не представляется возможным интенсифицировать процесс обезво-

живания целлюлозы на них в дальнейшем. Поэтому в настоящее время изыскивают другие, более эффективные способы обезвоживания целлюлозы не в виде листа, а в виде гранул, что позволит значительно поднять производительность. Тем не менее статистические данные, представленные на рис. 50, достоверно отражают мировой процесс изменения производительности пресспатов и описываются уравнением

$$q = 71 / \{0,102 + \exp [2,31 \exp (-0,042t)]\},$$

(t_0 — 1900 г.).

4.2. Транспортные машины

Если исследователь не является специалистом в области, где производится попытка установить закономерности или дать прогноз развития, то в принятии решений следует быть чрезвычайно осторожным, поскольку, как уже было сказано, внешние признаки или статистические данные, результирующие сложные процессы, не отражают закономерностей и, как правило, служат поводом для принятия ошибочных решений.

Когда отсутствует обоснование закономерностей, возникают серьезные трудности в реалистической оценке развития исследуемого процесса. Это хорошо видно из рис. 14, приведенного в трактовке А. Л. Флойда [20]. Здесь сделана попытка прогнозировать долгосрочную закономерность изменения роста максимальной скорости средств передвижения. Видно, что приведенные кривые реализации этой задачи для различных способов передвижения — от конного экипажа до наиболее эффективных средств, которыми располагает человечество, — ракет, плохо или совсем не согласуются с линией тренда (общей тенденции развития исследуемого про-

цесса). До первой из трех кривых авиатранспорта (сверхзвуковой авиатранспорт мы относим к ним) отклонений еще не возникает, так как эти события уже имели место. Что же касается дальнейшего прогноза, то наблюдается расхождение теоретической концепции — тренда и реального освоения скоростей передвижения с помощью ракет.

Как будет показано ниже, трактовка многостадийного развития скорости полета в авиации не только позволяет избежать ошибок при аппроксимации статистических данных и прогнозе на будущее, но и является ключевым фактором для определения места и роли ракет как более эффективного средства дальнейшего освоения скоростей передвижения. Правильно выбранный теоретический предел общей тенденции развития скоростей передвижения (скорость света) бездоказательно отнесен автором [20] к реализации примерно в середине третьего тысячелетия, что и обусловило расхождение.

Если без причинно-следственного ретроспективного анализа развития, причем с весьма ограниченными статистическими данными, выполняется построение хронологических графиков изменения тех или иных параметров машин, оборудования или процессов, называемых Е. Робертсом «наивными моделями» [42], то, согласно Д. Брайту [20], развитие скорости в авиации может быть представлено графиком (рис. 51), который приводится в трактовке автора работы [42]. Здесь на основании действительных скоростей, указанных жирными точками, построена сплошная линия, которая при поверхностном анализе должна отражать намечающуюся тенденцию развития скорости американских военных поршневых самолетов.

Если учесть, что скорость звука является теоретическим пределом скорости для поршневых винтовых самолетов, то согласно рис. 51 после 1940 г. возможны были три темпа роста скоростей американских поршневых самолетов (см. штриховые линии). Они асимптотически приближаются к скорости звука. Согласно принципу построения «наивных моделей», сохранение ретроспективных

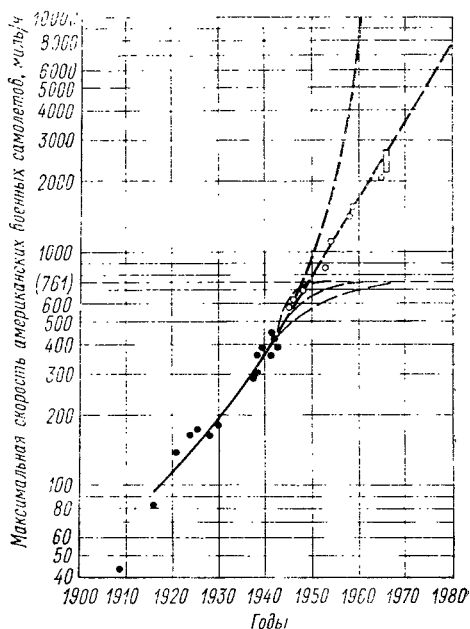


Рис. 51. Развитие скоростей в авиации в США [42]

тенденций развития в перспективе должно обеспечивать предположительный рост скорости, показанный жирной штриховой линией. В действительности же рост скорости военных рекордных самолетов аппроксимируется другой кривой. Достичь этого роста оказалось возможным лишь с созданием средств передвижения, способных преодолеть звуковой барьер, а это в свою очередь связано не только с разработкой нового реактивного двигателя, но и прежде всего с появлением нового способа решения стоящей перед авиацией задачи.

Таким образом, рис. 51 характеризует скорее ошибочность прогноза, основанного на методе «наивных моделей» или на экстраполяции тенденций, чем возможность его применения для практических выводов.

Между тем динамичность развития авиации, как мировой, так и отдельных стран — Советского Союза, США, Франции, Англии и др., свидетельствует об активном применении высших научно-технических достижений в этой области. Уже на заре авиации в начале 1900-х гг. предпринимались попытки применить газовые турбины для летательных аппаратов. Так, в 1929 г. Гриффит (Англия) построил турбину с компрессором для самолета. В 1934 г. немецкий изобретатель Г. Охайн взял патент на турбореактивный двигатель с центробежным компрессором.

В 1937 г. английская фирма «Пауэр Джетс» демонстрировала первые образцы реактивных авиационных двигателей. В 1939 г. фирма «Брамо Энджин» разработала проект турбореактивного двигателя с осевым компрессором. В 1940 г. фирма «Глоучестер Эйркрафт» начала строительство самолета с реактивным двигателем.

В 1930 г., когда в обозримом будущем еще не предвиделось особых трудностей в повышении скоростей отечественной поршневой авиации, Ф. А. Цандер в Ленинграде испытал первые реактивные двигатели, которые предполагалось установить на летательных аппаратах. Исследуя тенденции развития скоростей самолетов, опубликованные в материалах работ [9, 37, 47], необходимо отметить глубину исторического анализа развития конструкций и параметров самолетов, сделанного В. Ф. Болховитиновым [9]. В его труде впервые проведен причинно-следственный анализ развития конструкций, обеспечивающих рост скорости самолета, причем не только раскрыты причины, определяющие процессы и условия, тормозящие развитие, но и дана общая формула существования самолета в различные периоды усовершенствования его конструкций. В. Ф. Болховитинов отмечает: «В итоге скорости с 80 км/ч в 1909 г. дошли до 150—180 км/ч в 1925 г., увеличиваясь в этот период примерно на 6 км/ч в год... В 1925—1927 гг. двигателестроение сделало большой шаг вперед по увеличению числа оборотов двигателя... В 1934—1935 гг. рост скорости явился следствием резкого уменьшения сопротивления самолетов. Скорости в этот период ежегодно увеличивались в среднем на 80 км/ч...»

Дальнейший рост скоростей за счет увеличения мощности поршневых авиационных двигателей того времени уже не мог быть обеспечен, так как ресурсы этих двигателей по удельному весу к 1945 г. были почти исчерпаны. Улучшение формы самолетов тоже не давало больших перспектив... Дальнейшего увеличения скорости нужно было ожидать от нового типа двигателя. Таким двигателем оказался турбокомпрессорный воздушно-реактивный двигатель. Скорость поднялась с 550—580 до 800—850 км/ч».

Построенный по данным [9] график развития скоростей легких самолетов (рис. 52) показывает, что можно выделить три стадии, аналогично тому, как это было сделано при анализе развития бумагоделательных машин. Эти стадии можно описать отдельными S-функциями: первая стадия — до 1930 г., вторая — 1930—1945 гг., третья —

Таблица 4.3. Постоянные величины уравнения S-функции развития скорости самолетов

Стадии	L	a	b	β
1	344	0,155	1,71	0,133
2	805	0,142	1,104	0,0985
3	4300	0,075	5,14	0,117

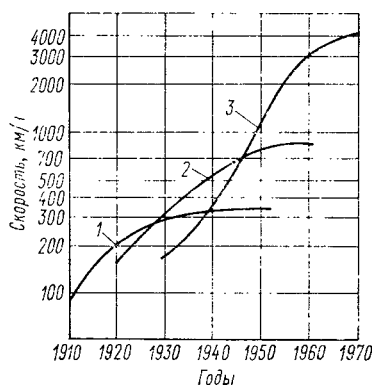


Рис. 52. Развитие скоростей легких военных самолетов

1, 2, 3 — последовательные стадии развития

после 1945 г. К 1930 г. появились новые высокооборотные двигатели, после 1945 г. — турбокомпрессорные воздушно-реактивные. Появление новых двигателей совместно с применением новых материалов для планера и улучшением конструкции были основными причинами повышения скорости летательных аппаратов. Все три стадии можно описать общим уравнением

$$v = L_i / \{a_i + \exp [b_i \exp (-\beta t)]\},$$

где v — скорость, км/ч (t_{01} — 1914 г., t_{02} — 1930 г., t_{03} — 1952 г.).

Коэффициенты этого соотношения приведены в табл. 4.3. Прослеженную аналогичную стадийности развития самолетов и бумагоделательных машин нельзя считать завершенной. Возможно, что в последние годы появились другие поколения самолетов, выявление и описание закономерностей развития которых относится к компетенции специалистов в области авиации.

На рис. 53 приведены кривые роста скоростей реактивной и винтовой авиации по данным работы [42]. Автор этой работы

Дж. Martino дает лишь сравнительный анализ возможностей поршневой и реактивной авиации с точки зрения реализации скорости полета самолетов. Однако очевидно, что концепция много-стадийного развития систем, аппроксимируемых S-функциями, как и другие характеристики семейства S-функций, полностью под-

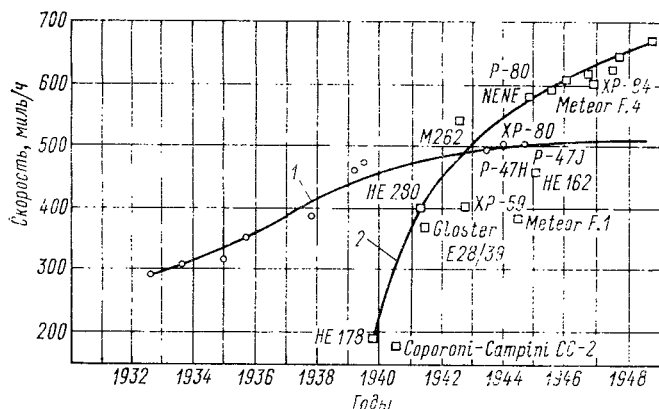


Рис. 53. Развитие скорости винтовой (1) и реактивной (2) авиации [42]

тверждаются этим рисунком. Здесь хорошо видна стадийность развития скорости летательных аппаратов, графически подтверждается также важнейший принцип, заключающийся в том, что в недрах каждой предыдущей стадии развития технических систем зарождается последующая, жизнеспособность и эффективность которой всегда выше предыдущей.

4.3. Энергетическое оборудование и машины-двигатели

Главным фактором, определяющим уровень развития материальной культуры общества, является его энерговооруженность. Она состоит из двух частей: одна относится к энерговооруженности бытовой жизнедеятельности человека, другая — к энерговооруженности промышленной. Современные суммарные затраты энергии в пересчете на одного человека в год в развитых странах составляет до 10 кВт, превышая в 100 раз среднюю мускульную мощность человека [30]. Такой гигантский скачок энерговооруженности, динамика изменения которой приведена на рис. 54 [12], также подчиняется своим закономерностям, отображая активную часть S-функции. В этой работе приводятся три ступени развития энергетики, характеризующиеся резким различием применяемых форм энергии по энергоемкости:

1) использование первичной механической (гидравлической, ветровой) энергии с энергоемкостью порядка 100—10 000 Дж/кг;

2) использование первичной тепловой энергии с энергоемкостью $30 \cdot 10^6$ Дж/кг;

3) использование первичной ядерной энергии с энергоемкостью $(85 \div 630) 10^{12}$ Дж/кг.

Такая трактовка не вызывает сомнений и подтверждает характер кривой рис. 54, которая частично отображает результирующие показатели темпов развития энергетики за 110 лет, не раскрывая более сложных внутренних процессов этого развития. Их можно распознать, лишь проведя причинно-следственный анализ изменения энерговооруженности силами специалистов. Данные для такого анализа в работе [12] отсутствуют. Кроме того, приведенный рисунок относится к «доядерному» периоду развития энергетики, в нем нет современных характеристик.

Академик П. Л. Капица, объясняя объективную неизбежность грядущего энергетического кризиса из-за истощения запасов традиционных энергетических ресурсов, основывается на законе сохранения энергии, так как ограниченность возможностей использования энергетических ресурсов обусловлена законом, требующим во всех процессах преобразования энергии возрастания энтропии. Все это подтверждает наличие и в данном случае теоретического предела развития S-функции, отражающей динамику изменения этого способа реализации процесса получения энергии. Можно предположить, что в продолжении кривой рис. 54 найдет отражение и снижение темпов роста доядерной энергетики, и ее развитие в следующей стадии, когда будут крупномасштабно использоваться ядерная энергия и энергия термоядерного синтеза.

Авторы работы [12] приводят пять качественных характеристик ступеней развития энергетики, это:

- биоэнергетика (энергия человека и животных);
- механическая энергетика (энергия потоков воды и воздуха);
- теплоэнергетика (энергия сжигаемого топлива);
- комплексная энергетика (первичная — тепловая и гидравлическая, вторичная — электрическая);
- атомная энергетика (энергия ядерных реакций).

Здесь также прослеживается постадийная смена способов получения энергии по мере овладения человеком силами природы и развития науки и техники.

Рассмотрим теперь закономерности развития машинной базы энергетики — энергетических машин и машин-двигателей.

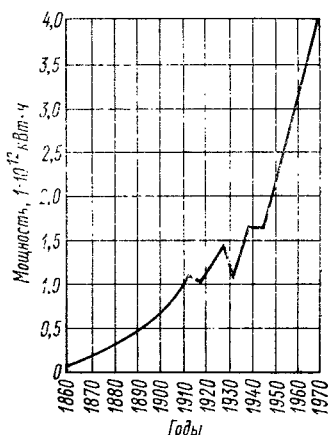


Рис. 54. Развитие мировой энергетики [12]

Паровые котлы

Главным параметром этого вида энергетического оборудования является паропроизводительность, измеряемая количеством пара, производимого котлом в час. Единичная мощность паровых котлов

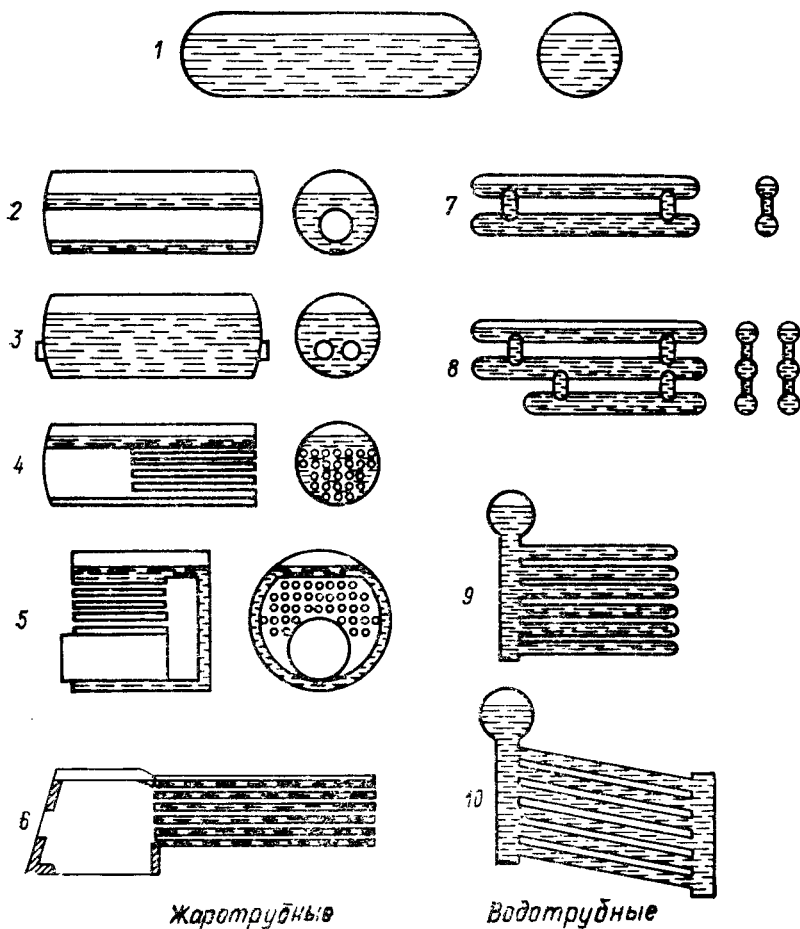


Рис. 55. Схемы развития конструкций паровых котлов

1 — простой цилиндрический котел; 2 — корнуоллийский котел с одной жаровой трубой; 3 — ланкаширский котел с двумя жаровыми трубами; 4 — пролетный котел; 5 — шотландский котел; 6 — пароводяной котел; 7 — котел с дроблением водяного пространства; 8 — котел с подогревателем; 9 — однокамерный котел высокого давления; 10 — двухкамерный котел

за последние 60 лет возросла более чем в 100 раз. В работе [12] дан подробный анализ развития всех конструкций паровых котлов со времен Ползунова и Ньюкомена, а в работе [6] — анализ развития отечественных конструкций котлов. На рис. 55 показаны

схемы развития конструкций паровых котлов, в которых главным путем повышения производительности являются повышение давления пара и увеличение поверхности нагрева рабочих органов. Взятые из этой работы данные роста давления пара в паровых котлах интерпретированы нами в виде графика рис. 56, который свидетельствует об одностадийном изменении этого параметра. Стабилизация в последнее десятилетие верхнего предела давления связана с отсутствием надлежащих материалов, способных воспринять все возрастающие термомеханические нагрузки рабочих органов паровых котлов.

Хронологическое уравнение S-функции давления записывается так:

$$p = 260 / \{0,071 + \exp [3,48 \exp (-0,046t)]\},$$

где p — давление в котле, Па (t_0 — 1900 г.).

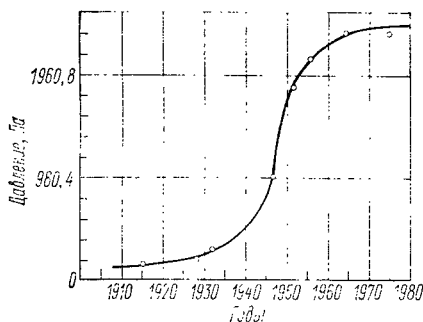


Рис. 56. Изменение давления пара в паровых котлах

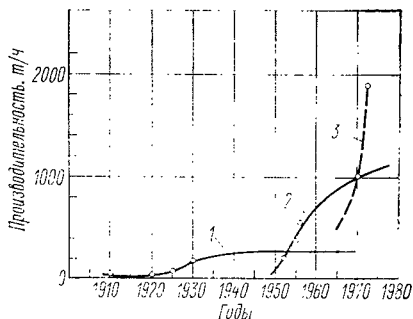


Рис. 57. Изменение паропроизводительности котлов [12]

1, 2, 3 — стадии развития

Прогрессивное развитие давления в паровых котлах сопровождалось ростом нагрева пара. Этот параметр повысился почти в два раза за период с 1910 г. и достиг к 80-м годам 565 °С. Конструктивные усовершенствования, интенсифицировавшие теплопередачу, позволяли динамично повышать главный параметр котлов — паропроизводительность.

На рис. 57, построенном по данным работы [12], иллюстрировано трехстадийное развитие этого параметра. Приводимые данные характеризуют также мировые достижения в этой области, поскольку отечественное котлостроение занимает одно из ведущих мест по научным разработкам, техническому уровню и масштабности промышленного производства котлоагрегатов.

Данные рис. 57 свидетельствуют о наличии двух стадий, сменяющихся третьей, весьма динамичной, которую из-за отсутствия статистических данных можно лишь обозначить в начальном

периоде. Однако имеющиеся в работе [12] материалы позволили получить хронологическое уравнение S-функций, которое записывается так:

$$Q = L_i / \{a_i + \exp[b_i \exp(-\beta t)]\},$$

где Q — паропроизводительность, т/ч (t_{01} — 1910 г., t_{02} — 1950 г.).

Таблица 4.4. Постоянные коэффициенты S-функции роста производительности котлов

Стадии	L	a	b	β
1	210	0,071	2,12	0,185
2	1380	0,053	2,06	0,133
3	4600	0,078	1,30	0,41

Постоянные коэффициенты этого уравнения приведены в табл. 4.4.

Выявленные закономерности изменения параметров и конструкций котлоагрегатов не являются результатом их абстрактного развития. Будучи базовым видом оборудования для получения механической и электрической энергии, паровые котлы развивались, в частности, под влиянием тех машин-двигателей, которые использовали энергию пара.

В связи с этим интересно проанализировать закономерности развития паровых турбин как наиболее распространенного современного преобразователя энергии пара, сменившего паровые машины поршневого типа.

Турбины

Являясь преобразователем энергии воды, пара и газа, этот вид машин-двигателей, имеющих высокий КПД, является самым распространенным в настоящее время. Это неслучайно, так как рабочие органы турбин, как и у бумагоделательных машин, не имеют потерь времени на холостые движения и представляют собой тела вращения с двумя или большим количеством опор. Эти факторы в свою очередь являются основой динамичного развития главного и основных параметров турбин.

Турбина, как правило, выполняет функции промежуточного компонента при получении электрической энергии в блоках с электрическими машинами. Поэтому такой комплекс часто трактуется как единая большая техническая система, главный параметр которой — электрическая мощность. Однако, как показывает анализ статистических данных, развитие турбин подчинено своим закономерностям. В частности, это можно проследить на примере паровых турбин.

По материалам работы [16] построен график изменения мощности паровых турбин, изготавливаемых в СССР (рис. 58). Несмотря на отсутствие данных развития мирового паротурбостроения, этот график отражает качественные характеристики анализируемого процесса по причинам, характерным для отечественного котлоагрегатостроения, о которых уже говорилось. В частности, данные рис. 58 свидетельствуют о двухстадийном развитии паровых турбин. Зарождение второй стадии обусловлено накопленным опы-

том в первой стадии, а также разработкой научно обоснованных методов расчета рабочих аппаратов турбин и появлением высококачественных материалов для турбинных лопаток и колес к 50-м гг. нашего столетия [41]. Повышение частоты вращения и рабочих параметров турбин позволило резко увеличить их единичную мощность, что получило наглядное отражение во втором поколении машин (рис. 58).

Общее уравнение S-функции хронологического развития мощности паровых турбин записывается так:

$$N = L_i / \{a_i + \exp[b_i \exp(-\beta t)]\},$$

где N — мощность, кВт (t_{01} — 1925 г., t_{02} — 1950 г.).

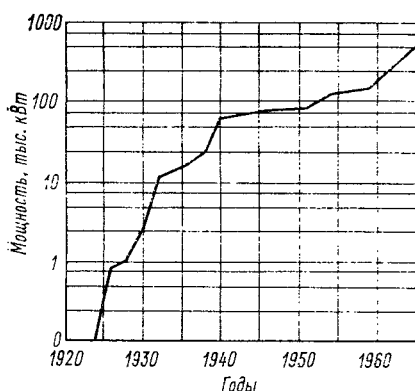


Рис. 58. Изменение мощности паровых турбин [16]

1, 2 — стадии развития

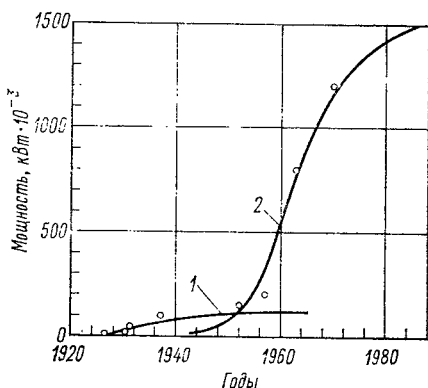


Рис. 59. Изменение единичной мощности гидротурбин [32]

Постоянные коэффициенты этого уравнения приведены в табл. 4.5.

Можно предположить, что подобные закономерности развития свойственны и турбинам других типов, поскольку функциональное назначение и способы преобразования первичной энергии в механическую у паровых и газовых турбин, а также у гидротурбин аналогичны.

В работе Н. Н. Ковалева [32] приведен график изменения единичной мощности гидротурбин без указания их типа, что обусловило необходимость привести этот график в трактовке автора (рис. 59). Вид графика свидетельствует об S-образном характере развития этого параметра. Рост его в конце 50-х гг. позволяет предположить зарождение второй стадии, характерной в эти годы и для паровых турбин. Возросшая мощность гидротурбин для крупнейших гидроэлектростанций Сибири, построенных в 70-е гг., подтверждает это предположение.

Использование данных работы [32] и более ранних работ Н. Н. Ковалева позволило составить графики развития поворотно-лопастных и радиально-осевых турбин (рис. 60, 61), подтверждающие многостадийную закономерность их развития. Характерно также совпадение годов смены поколений на переходе от 50-х к 60-м годам нашего века.

Хронологическое уравнение S-функций этих графиков записывается в виде

$$N = L_i / \{a_i + \exp [b_i \exp (-\beta t)]\},$$

где N_i — мощность, кВт (t_{01} — 1925 г., t_{02} — 1950 г. — для поворотно-лопастных турбин, t_{01} — 1930 г., t_{02} — 1950 г. — для радиально-осевых турбин).

Постоянные коэффициенты этого уравнения даны в табл. 4.6.

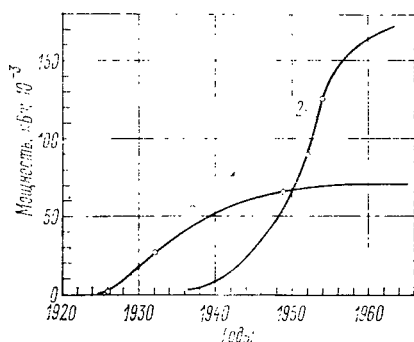


Рис. 60. Изменение мощности поворотно-лопастных турбин

1, 2 — стадии развития

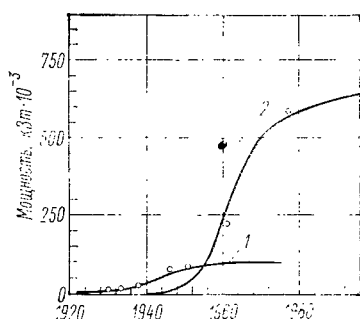


Рис. 61. Изменение мощности радиально-осевых гидротурбин

1, 2 — стадии развития

Приведенные выше закономерности роста мощности гидротурбин обусловили соответствующие изменения конструкций гидрогенераторов, рост единичной мощности которых аналогичен по количественным и качественным параметрам. На рис. 62, который приведен без обработки из труда [12], очевиден двухстадийный характер изменения единичной мощности гидроагрегатов.

Хронологически совпадают качественные и количественные показатели роста этого параметра (см. рис. 60 и 61). В целом же переход от первой стадии развития энергетического оборудования ко второй обусловлен разработкой в этот период теоретической основы для проектно-конструкторских расчетов, накоплением опыта создания и эксплуатации энергомашин и, что особенно важно, промышленным освоением высококачественных конструкционных и вспомогательных материалов [23, 24, 39].

Динамика изменения мощности стационарных газотурбинных установок для привода электрогенераторов хорошо иллюстри-

Т а б л и ц а 4.5. Постоянные коэффициенты уравнения S-функции мощности паровых турбин

Стадии	L	a	b	β
1	130	0,061	3,74	0,153
2	1750	0,087	3,21	0,106

Т а б л и ц а 4.7. Изменение мощности газотурбинных установок для электрогенераторов

Показатели	Год выпуска									
	1949	1958	1961	1970	1974	1975	1976	1978	1979	1980
Фирма (страна-изготовитель)	AEG-Kanis (ФРГ)	AEG-Kanis (ФРГ), GE (США)	W-Capada	ВВС (Швейцария)	KV (ФРГ)	Fiat (Италия)	GE (США)	AEG-Kanis (ФРГ)	IBE (Англия) ВВС (Швейцария)	ВВС (Швейцария)
Тип машины	G-3142	G-5341 GE-5361	W-3016	TYPE 13	V-94-2	TQ-50	G-9151	G-9141	MS-9001E KA-9-4	KA-11-4
Мощность, кВт	10 200	24 700 25 400	32 300	88 900	120 640	92 600	109 300	109 000	114 000 127 480	273 000

Т а б л и ц а 4.6. Постоянные коэффициенты S-функции развития гидротурбин

Тип турбин	Стадии	L	a	b	β
Поворотные лопастные Радиально- осевые	1	72	0,087	3,23	0,137
	2	190	0,054	1,07	0,253
	1	120	0,067	2,31	0,008
	2	710	0,093	2,87	0,106

руется табл. 4.7. Здесь по данным [68] приведены максимальные мощности освоенных зарубежными фирмами новых газотурбинных установок за три последних десятилетия.

Построенный по этим данным график (рис. 63) хорошо отражает стадийность изменения данного параметра. Здесь, так же как и в предыдущих системах турбин, характерен значительный рост кривой в 60-е годы. Судя по резкому увеличению мощности в короткий период перехода от 70-х к 80-м годам, в этот период зарождалась новая стадия развития этих технических систем. Она была обусловлена снижением темпов прироста мощностей газотурбинных установок, которые не могли далее удовлетворять требованиям интенсификации энергетических процессов. Варьирова-

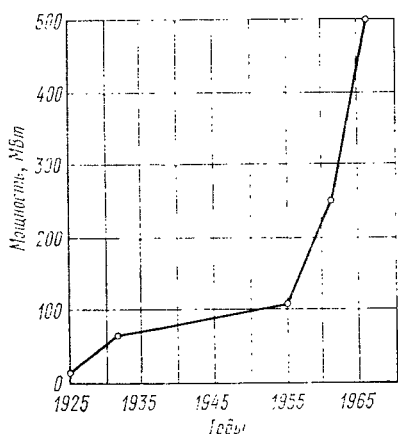


Рис. 62. Изменение единичной мощности гидроагрегатов в СССР [12]

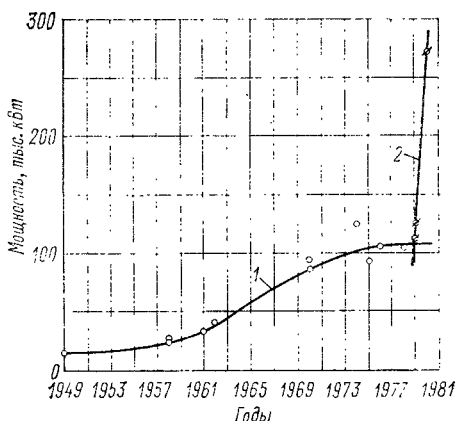


Рис. 63. Изменение мощности стационарных газотурбинных установок
1, 2 — стадии развития

ние основными параметрами — степенью сжатия (10—16), расходом воздуха (при 1000—1200 °С) — не позволяло в последние десять лет добиться значительных успехов в приросте единичных мощностей. Поэтому их создатели обратились к поискам других методов интенсификации энергетических процессов в газотурбинных установках, в частности, к разработке комбинированных парогазотурбинных систем. Уже небольшой опыт их реализации свидетельствует о значительных возможностях такой комбинации, что отражено в табл. 4.7 и на рис. 63 резким скачком единичной мощности.

В целом следует отметить высокие темпы роста параметров этих технических систем, которые стали объективной реальностью лишь в конце 40-х годов, а уже в начале 80-х годов получили в своем развитии реальные условия для перехода ко второй стадии.

4.4. Другие виды технических систем

Мы проанализировали закономерности изменения главных параметров технических систем, имеющих высокую динамику режимов нагружения при эксплуатации. Для них характерны высокий износ трущихся деталей, а значит, небольшие сроки службы. Эти обстоятельства заставляют часто производить замену отслуживших технических систем, причем каждый раз они, как правило, заменяются более совершенными конструкциями. Все это обуславливает и адекватную динамику изменения темпов их развития.

Однако в народном хозяйстве используются также другие орудия труда, которые, являясь статическими системами, подвергаются тем не менее усовершенствованию во времени. Характер-

Таблица 4.8. Диаметры рефлектора телескопа

Показатели	Место установки				БТА (СССР)
	Маунт-Гамильтон (США)	Маунт-Вильсон (Англия)	Маунт-Вильсон (Англия)	Маунт-Паломар (США)	
Год установки	1879	1900	1917	1949	1976
Диаметр рефлектора	0,90	1,5	2,50	5,0	6,0

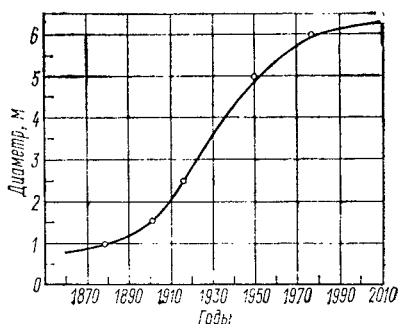


Рис. 64. Изменение диаметра зеркала телескопов

ным примером таких технических систем могут служить оптические телескопы, длительное время бывшие основным средством астрономических наблюдений. Несмотря на появление радиотелескопов и других научных систем для исследований Вселенной, оптические телескопы широко используются для этих целей и в настоящее время.

Главным параметром этой системы является разрешающая способность телескопа, которая в основном зависит от диаметра зеркала или рефлектора. На рис. 64 приведен график роста диаметра рефлекторов телескопов примерно за 100 лет, который построен по данным табл. 4.8.

Характер кривой изменения этого параметра свидетельствует об одностадийном его развитии. S-функция развития диаметров телескопов описывается уравнением

$$D = 7,5 / \{0,088 + \exp[2,38 \exp(-0,021t)]\},$$

где D — диаметр рефлектора, м (t_0 — 1870 г.).

В работе [19] имеются интересные данные, характеризующие рост числа открытых химических элементов, которые в трактовке автора монографии Г. М. Доброва приведены на рис. 11. Он иллю-

стрирует картину влияния новых методов на рост темпов открытия химических элементов. Явно выраженная стадийность позволяет с позиций новых воззрений, изложенных в настоящей работе, дать более глубокую и объективную характеристику процесса открытия химических элементов.

На рисунке отчетливо выделяются три стадии развития (если не считать элементов предьстории, число которых было немногим более десяти). Первая стадия процесса открытия новых элементов химическими методами, которыми располагала в то время наука, длилась примерно до 1860 г. К этому времени по существу были исчерпаны практические возможности обнаружения элементов химическим путем; число открытых элементов вместе с элементами предьстории достигло 60. Заметно снижаются темпы открытия новых химических элемен-

Таблица 4.9. Постоянные коэффициенты уравнения S-функции динамики открытия химических элементов

Стадии	L	a	b	β
1	69	0,15	3,85	0,017
2	115	0,15	0,905	0,011
3	138	0,15	0,705	0,0074

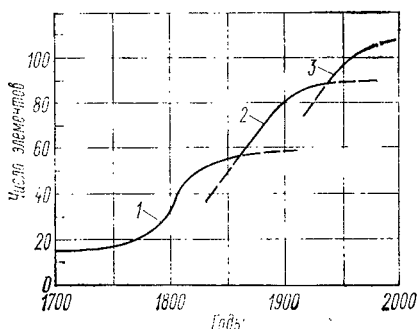


Рис. 65. Стадийность открытия элементов таблицы Д. И. Менделеева
1, 2, 3 — стадии развития

тов после первой трети XIX в. Во второй половине XIX в. интенсивность открытия элементов возрастает.

Создание Д. И. Менделеевым периодической системы элементов послужило теоретической базой для новых, более эффективных поисков. Появились физические методы обнаружения химических элементов, в частности, спектральный и другие. Однако и эта база исследования материи к 40-м годам XX столетия исчерпала свои возможности и стала малоэффективной. Вместе с тем накопленные научные знания и технические возможности позволили применить для исследований бомбардировку ядер частицами больших энергий. Новые методы повысили эффективность решения задачи и обусловили наступление следующей, третьей стадии процесса выявления еще не известных химических элементов.

Как уже говорилось, ко времени создания и формулирования Д. И. Менделеевым закономерностей периодической системы элементов наука располагала знаниями о шести десятках химических элементов. В настоящее время в арсенале ученых имеется более двухсот частиц, составляющих атомное ядро. Весь ход познания материи свидетельствует об объективной возможности появления новых научных работ и открытий, на основе которых может быть

сформулирован общий закон строения материи как основная теоретическая база для обоснования будущих методов ее познания.

Математическая интерпретация статистических данных рис. 11 представляется хронологической S-функцией:

$$N = L_i / \{a_i + \exp[b_i \exp(-\beta t)]\},$$

где N — число элементов, ед. (t_{01} — 1700 г., t_{02} — 1850 г., t_{03} — 1930 г.).

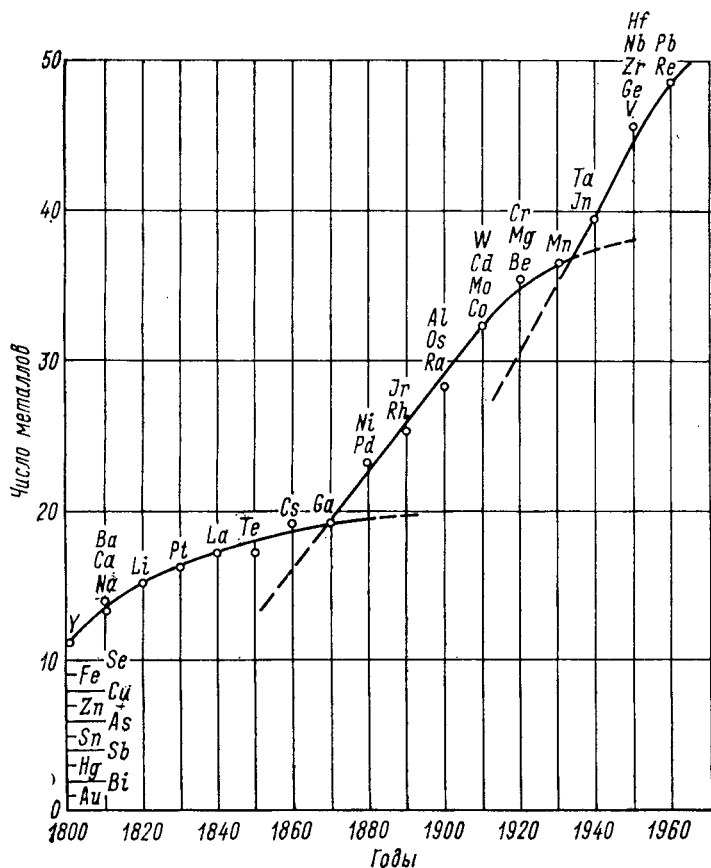


Рис. 66. Стадии промышленного применения металлов в промышленности [17]

Постоянные коэффициенты этого уравнения приведены в табл. 4.9.

Графическая интерпретация уравнения S-функции открытия новых химических элементов дана на рис. 65.

Закономерности развития процесса открытия новых элементов обусловили также их промышленное применение с соответствующим хронологическим сдвигом. На рис. 66 приведен график роста промышленного применения элементов группы металлов [17]

с 1810 по 1960 г. Отчетливо видны три стадии применения металлов в промышленности: первая — до 1870 г., вторая с 1870 по 1940 г. и третья — после 1940 г. Эта динамика во многом обусловила технический прогресс. Из графика видно, что до 1800 г. применялось всего 12 металлов (Au, Bi, Hg, Sb, Sn, As, Zn, Cu, Fe, Se, Y, Na), в первой стадии, после 1800 г., прибавилось еще семь (Ca, Ba, Li, Pt, La, Te, Cs), во второй — 17 (Pd, Ni, Ga, Sc, Ir, Rh, Os, K, Al, Co, W, Cd, Mo, Be, Mg, Cr, Mn), в третьей — 10 (Ta, In, Ti, V, Ce, Zr, Nb, Hf, Pb, Re).

Каждая стадия может быть описана следующим уравнением:

$$Q = L_i / \{a_i + \exp[b_i \exp(-\beta i t)]\},$$

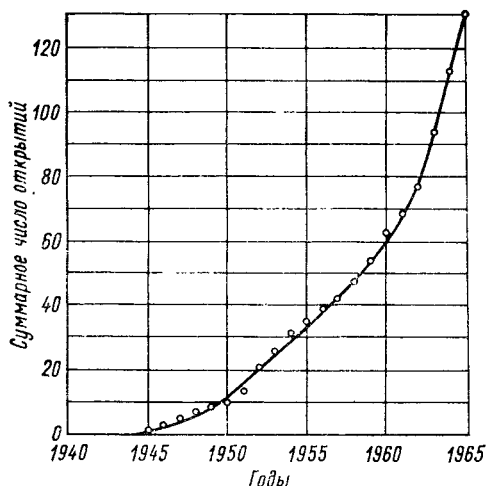


Рис. 67. Динамика роста числа открытий при разработке ракеты «Ланс» [20]

где Q — число элементов группы металлов, ед. (t_{01} — 1800 г., t_{02} — 1870 г., t_{03} — 1940 г.).

Постоянные коэффициенты этого уравнения даны в табл. 4.10.

Таблица 4.10. Постоянные коэффициенты уравнения S-функции применения металлов в промышленности

Стадии	L	a	b	β
1	20	0,065	0,69	0,022
2	38	0,091	0,092	0,020
3	55	0,063	0,51	0,078

Рассмотрим процессы развития еще нескольких характерных систем, подтверждающие установленные закономерности.

Р. С. Айзенсон [20] приводит данные по числу открытий, осуществленных при разработке ракеты «Ланс». Эти сведения охватывают одну стадию и обусловлены сначала разработкой самой идеи системы до периода заключения контракта. По утверждению автора, после заключения контракта в течение года темп прироста знаний ускоряется вдвое; это согласуется с концепцией многостадийного развития систем. Характер темпов изменения этого процесса, представленного в нашей трактовке (рис. 67), имеет вид графической интерпретации S-функции.

В той же работе [20] Р. С. Айзенсон приводит обобщенные данные по числу открытий, осуществленных при разработке и создании различных видов техники, связанной с современными системами оружия. В их число входят самолеты, ракеты на жидком и твердом топливе, ракеты с радио- и инерционным управлением,

радары, ЭВМ, ядерные боеголовки, взрывчатые вещества, мины и торпеды. Обобщенные данные включают примерно 710 событий за период 1945—1963 гг. Рис. 68, построенный на основе приведенных в работе [20] данных, свидетельствует об адекватности процесса развития отдельных систем и обобщенной закономерности, вобравшей в себя суммарные характеристики их множества как такового.

Нами исследован процесс роста в мировой практике числа патентов и авторских свидетельств, полученных при разработке и освоении способа производства бумаги без использования воды. Технологической средой для диспергирования волокон в данном случае служит воздух.

Разработанный еще в 1931 г. ленинградскими учеными М. В. Бондаренко и М. Д. Дмитриевым, этот «сухой» способ производства бумаги основан на осаждении диспергированных волокон в воздушном потоке на газопроницаемую движущуюся сетку, введении в образованное полотно связующих веществ и последующей его отделке. Способ привлекает внимание специалистов не только целлюлозно-бумажной, но и текстильной и других отраслей промышленности благодаря высокой механической прочности, равнопрочности, эластичности, высокой пористости и впитываемости получаемого полотна. «Сухой» способ отличается большой экономичностью и по существу не приводит к загрязнению окружающей среды, в отличие от традиционного способа, где технологической средой служит вода. Основным недостатком «сухого» способа производства бумаги является низкая производительность, обусловленная пределом скорости осаждения волокон, витающих в нисходящем воздушном потоке. Предел этот невелик, и его превышение приводит к непреодолимым проблемам при формировании полотна, поскольку возникает нежелательная ориентация волокон по направлению движения аэросuspензии.

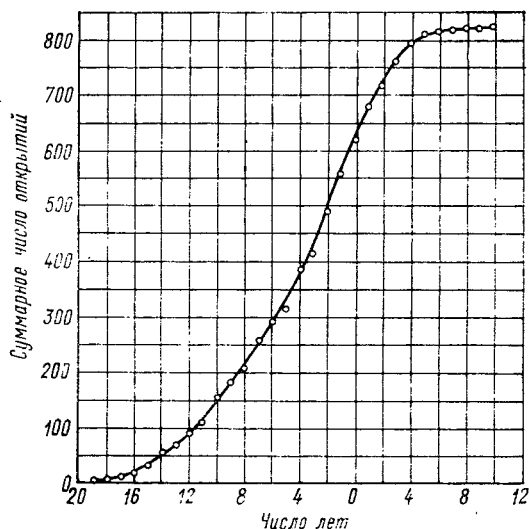


Рис. 68. Обобщенная характеристика процесса развития военно-технических систем [20]

Примерно до 60-х годов указанный способ применялся редко. В дальнейшем многие страны (США, Дания, Япония, Канада, Англия) начали довольно широко его использовать. В целом за

50-летний период изготовления бумаги без использования воды эта идея получила всестороннее развитие, в частности и в плане создания машин, реализующих данный принцип.

Обзор публикаций, патентов и авторских свидетельств позволил построить оригинальный график динамики выхода в свет этих документов (рис. 69). Кривая представляет собой S-функцию одностадийного развития процесса, описываемого уравнением

$$Q = 400 / \{0,1 + \exp[5,3 \exp(-0,02t)]\},$$

где Q — суммарное число патентов и авторских свидетельств, t — время.

Медленный рост кривой с 1933 по 1956 г. характеризует период становления и освоения технологии и оборудования. С 1966

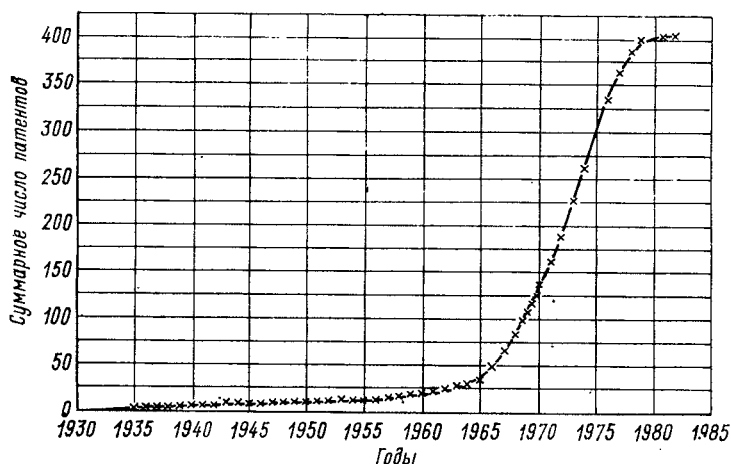


Рис. 69. Динамика роста числа патентов и авторских свидетельств при разработке и освоении «сухого» способа производства бумаги

по 1975 г. наблюдается период бурного развития техники, производства и соответственно роста числа патентов и авторских свидетельств. Начиная с 1976 г. наступает период замедления темпов роста кривой (рис. 69). Причиной можно считать то, что во всех проанализированных конструкциях, основанных на принципе витания волокон в воздушном потоке, были достигнуты пределы скорости осаждения суспензии на сетку, близкие к теоретическим. Естественно, будущее не за этим способом. Однако накопленный опыт позволил теоретически обосновать другой, так называемый аэродинамический способ, в котором применяется принцип, парадоксальный для «сухого» способа. Здесь в основу положено регулирование градиентов скоростей аэродинамической суспензии с целью управления волокнами при формировании полотна на сетке, движущейся со скоростью, более чем на порядок превышающей скорость при «сухом» способе производства бумаги.

Дж. Берд и Х. Дерракотт [20] приводят интересные данные (рис. 70), характеризующие повышение точности частот, имеющее явно выраженный двухстадийный характер. Примечательно, что переход от первой ко второй стадии развития и здесь приходится на период 50-х годов XX века. В первой стадии точности частот базировались на длительности полного оборота Земли вокруг своей оси. Точность секунды определяют как $1/86400$ средней продолжительности дня. Этим лимитировался теоретический предел точности, причем погрешность лежала в диапазоне 10^{-7} — 10^{-8} .

С появлением в 50-е годы XX века кварцевого генератора значительно повысилась точность эталона секунды. Однако недостаток кварцевого генератора, связанный с длительностью самого процесса получения эталона, обусловил замену введенного в 1956 г. на его основе эфемеридного времени на более точные и удобные способы эталонирования частот сначала на основе СВЧ-квантового генератора (мазер), а затем с помощью «часов» на пучке атомов цезия, позволивших измерять частоту с точностью $1/10^{10}$. В настоящее время появились еще более точные стандарты частоты, основанные на атомных переходах в водороде и таллии. Их возможности пока еще полностью не использованы.

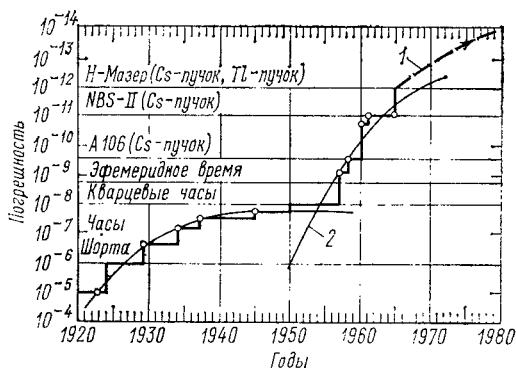


Рис. 70. Повышение точности стандартов частоты [20]

1 — трактровка Дж. Берда и Х. Дерракотта; 2 — трактровка автора

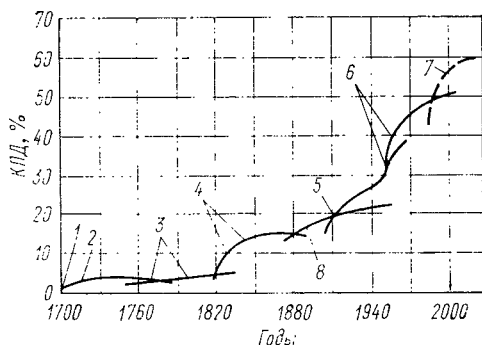


Рис. 71. Изменение КПД систем преобразования энергии [20]

Р. Эйрес [20] приводит систематизированные данные изменения КПД разных преобразователей энергии (рис. 71, 1—8) за период развития техники с 1700 г. Согласно закону сохранения энергии такая интерпретация КПД обуславливает одностадийность результирующей кривой, асимптотически приближающейся к теоретическому пределу, равному 100 %. Отсутствие теоретической базы, объясняющей закономерности роста КПД как интегрального по-

казателя любого преобразователя энергии, не позволило автору реально прогнозировать его рост в будущем. Экстраполируя тенденцию изменения КПД, Р. Эйрес ожидал к 1980 г. максимальный его рост до 55—60 %. Однако в 1980 г. под руководством академика И. А. Глебова в Институте электромашиностроения (Ленинград) испытан генератор, использующий явление сверхпроводимости, КПД которого значительно превышает 90 %. Намечена программа создания мощных промышленных установок на основе этого генератора, имеющих аналогичный уровень КПД¹.

Отметим, что многостадийный характер развития наблюдается не только у созданных человеком технических систем. Аналогичные закономерности существуют и при развитии других, например нетехнических систем. Не будучи специалистом в этих вопросах, автор не может претендовать на глубокие исследования процессов их развития. Однако даже по внешним признакам при анализе изменения статистических данных во времени можно судить о том, как совершенствуются и прогрессируют эти системы.

Например, многостадийный характер носит изменение показателей рекордных прыжков спортсменов в высоту. Основой наилучших достижений в данном случае являются методы тренировок и положение тела спортсмена при преодолении планки, фиксирующей высоту. Еще более показательным является характер изменения грамотности населения в Советском Союзе по сравнению с дореволюционной Россией. Здесь также прослеживаются три стадии, обусловленные потребностью общества в грамотных людях в зависимости от общественно-политического строя в различные периоды существования государства. Так, по данным работ В. И. Ленина [3] можно установить S-образную зависимость роста числа грамотных людей в докапиталистический период развития России, когда общественно-политические условия общества, являясь теоретическим пределом этого роста, определяли общественные потребности; они были невелики. В дальнейшем капиталистическая формация, обеспечившая динамичное развитие промышленности, техники, науки, обусловила и значительно более резкий рост числа грамотных людей, которые требовались государству. Однако капиталистическое общество всегда создает веские причины для торможения процесса достижения всеобщей грамотности, поскольку сам принцип сосуществования эксплуатируемых и эксплуатирующих классов служит ограничением развития этого процесса.

В период развитого социализма в Советском Союзе уровень грамотности населения приближается к 100 %. Политические основы социалистического общества, взаимоотношения его членов между собой явились именно той базой, которая позволила добиться таких удивительных показателей за довольно короткий срок.

¹ Глебов И. А., Данилевич Я. Б., Шахтарин В. Н. Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. Л., Наука, 1981.

Могло бы сложиться впечатление, что достигнут предел в развитии этого процесса, а это противоречило бы принципам неограниченности развития во времени количественных и качественных показателей S-функции. Однако, базируясь на характеристике установленных в гл. 2 закономерностей, мы можем предположить, что процесс повышения уровня грамотности населения нашей страны будет продолжаться и впредь. Это объясняется тем, что условия развития науки, техники, народного хозяйства и культурного строительства социалистического общества, а главное, его общественно-политические основы уже в настоящее время требуют пересмотра самих критериев, которые определяют уровень грамотности как населения в целом, так и каждого человека в отдельности. До настоящего времени, как, впрочем и сейчас, критерием грамотности считается овладение человеком знаниями в объеме программы средней школы. Это тот необходимый и достаточный комплекс знаний, который позволяет отнести овладевшего им человека к разряду грамотных. Однако весь ход развития науки, техники и общества в целом свидетельствует о том, что если раньше для большинства профессий было практически достаточно знаний средней школы, то теперь все чаще этих знаний не хватает. Неслучайно многие операторские должности, необходимые для управления техническими системами, требуют специальных инженерных знаний, полученных в рамках программ высшей школы.

Характерным является также то, что в настоящее время для овладения подавляющим большинством рабочих профессий требуются знания в объеме средней школы. Советская система профессионально-технического образования уже переходит на всеобщее среднее образование с тем, что будущие рабочие одновременно овладевают комплексом профессиональных знаний. Этой задаче отвечает и проводимая в нашей стране реформа средней школы.

Прогрессирующий процесс роста грамотности при социализме, в частности, приведет к тому, что в обозримом будущем возникнет необходимость в пересмотре базовых концепций, определяющих уровень грамотности человека для современных условий социально-политического и научно-технического уровня развития общества.

Таким образом, с одной стороны в росте грамотности населения Советского Союза в сравнении с дореволюционной Россией прослеживаются аналогичные техническим системам закономерности, с другой — на основе принципа неограниченности развития во времени назревает необходимость пересмотра нормативных критериев грамотности как объективной реальности этого процесса.

Приведенные примеры свидетельствуют об общности выявленных закономерностей развития для всех видов технических систем и дают научно обоснованную методику для изучения специалистами подобных процессов у естественных и абстрактных систем.

4.5. Научно-технический прогресс и значение закономерностей развития технических систем

История человеческого общества изобилует попытками распознать законы общественного развития, научиться использовать их для планирования и рационального управления жизнедеятельностью людей. Актуальность этой проблемы возрастает по мере проникновения научно-технического прогресса в различные сферы народного хозяйства. Научно-технический прогресс, ускоряющий темпы развития и рост эффективности промышленности, а также непромышленных отраслей, сам развивается под воздействием объективных законов. Это обуславливает возрастание роли планирования, в основу которого положены распознанные людьми объективные закономерности развития различных систем и процессов, с которыми современному обществу приходится иметь дело.

В настоящее время уже невозможно представить решение каких бы то ни было научных или практических задач в любом государстве, независимо от его общественно-политического строя, без планирования и прогнозирования на более или менее отдаленные периоды времени, хотя сами принципы, используемые при этом, могут быть различными. Ныне широко применяются многочисленные методы решения задач прогнозирования на уровне государства или промышленных фирм, предприятий и организаций не только в социалистических, но и в капиталистических странах. Точные плановые расчеты и прогнозирование особенно нужны сейчас, когда темпы развития всех сфер жизнедеятельности человека, общественного производства резко возросли и имеют тенденцию к дальнейшему ускорению. Это тоже закономерность развития общественного производства. В этом смысле можно резюмировать рассмотренную в гл. I историю развития орудий труда на всем пути, пройденном человеческим обществом, как закономерное экспоненциальное сокращение хронологических периодов при механизации и автоматизации производственных процессов. Так, функционирование приспособлений и механизмов измерялось тысячелетиями, функционирование машин — веками. На автоматические системы машин и современные технические системы в связи с ускорением темпов научно-технического прогресса потребовались уже лишь десятки лет (см. табл. 1.1). Подтверждением этого тезиса служит и рис. 72 [20], на котором показана регрессионная связь относительного улучшения качественных показателей изделий техники, аналогичной предшествующей, и прироста знаний как основы для стимулирования в решении задач по улучшению качественных показателей и снижению издержек на изготовление и эксплуатацию изделий. Накопленные знания не только стимулируют качественное улучшение показателей орудий труда — технических систем, но и сокращают сроки их создания.

Г. М. Добров [19] приводит аналогичные тенденции из истории развития науки. Так, например, аристотелевская теория гравита-

ции существовала около 2 тыс. лет, пьютоновские идеи были обобщены и уточнены уже через 200 лет, атомно-корпускулярная теория Авогадро, базировавшаяся на неделимости атома, определяла научные концепции при исследовании структуры материи в течение столетия, теория Резерфорда и Бора о структуре атома просуществовала всего около 10 лет. В этой же работе Г. М. Добров приводит интересные данные по уменьшению лагов в ходе научно-технического прогресса (рис. 73). Закономерности изменения кривой по асимптоте свидетельствуют о благотворном влиянии всей суммы накопленных знаний на ускорение решения задач использования научных достижений в народном хозяйстве.

Здесь же приводится характерный пример количества времени, потраченного на переход от лабораторных исследований к массовому производству различного рода полимеров. По данным Г. А. Самойлова, если полученный в 1839 г. полистирол ожидал своего промышленного производства до 1930 г., т. е. 91 год, то капрон стали выпускать в промышленном масштабе через 40 лет, а нейлон — через 3 года после их получения. Разрыв между созданием этих трех полимеров составляет примерно сто лет.

Аналогичная закономерность прослеживается и в изменении длительности хронологических шагов бумагоделательных машин. На графике рис. 74 по оси ординат отложены временные периоды хронологических шагов «моральной» активности поколений, т. е. периоды между сменами поколений, по оси абс-

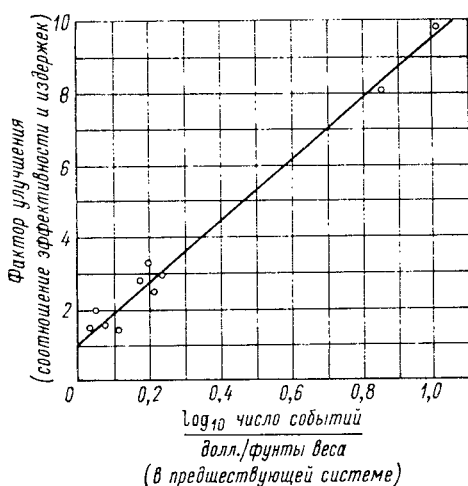


Рис. 72. Рост эффективности затрат в зависимости от объема накопленных знаний [20]

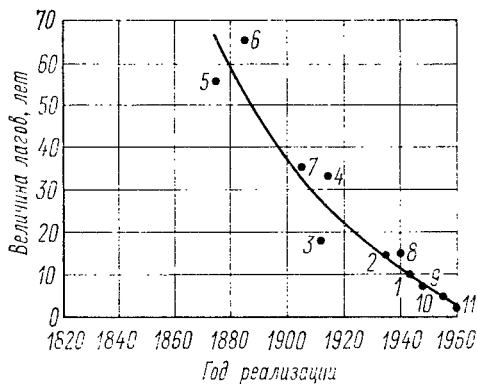


Рис. 73. Изменение лагов в ходе научно-технического прогресса [19]

1 — ядерный реактор; 2 — телевизор; 3 — рентгеновская трубка; 4 — вакуумная трубка; 5 — телефон; 6 — электромотор; 7 — радио; 8 — радар; 9 — атомная бомба; 10 — транзистор; 11 — солнечная батарея

цисс — календарные годы существования поколений бумагоделательных машин с момента их появления. Первое поколение бумагоделательных машин служило базой для развития бумажной промышленности примерно 100 лет (до 1900—1910 гг.). Назовем это хронологическим шагом поколения. Вторая стадия развития бумагоделательных машин длилась примерно до 1950 г., т. е. хронологический шаг второго поколения был 50 лет. Третье поколение имеет хронологический шаг длительностью уже 32 года [48].

Таким образом, имеет место сокращение шагов, подтверждающее тезис о том, что совершенство достигается асимптотически. Однако это относится скорее к совершенству методов реализации теоретических возможностей способа, с которым мы имеем дело. Причем чем больше совершенствуются методы, ограниченные типом, классом и видом технологических процессов, т. е. способом, тем больше возникает противоречий и проблем, которые порождают альтернативные идеи, приводящие к скачкообразному развитию исследуемого процесса.

Рис. 74 построен для конкретного метода производства бумаги (НВГО), поэтому можно анализировать лишь характер приближения экспоненты, проведенной через точки А, В, С, к оси абсцисс.

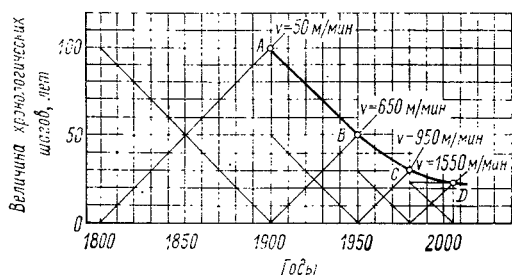


Рис. 74. Длительность хронологических шагов поколений бумагоделательных машин

Следует обратить внимание на то, что в пределах каждого поколения можно построить квадрат, диагональ которого лежит между точками начала и конца хронологического шага каждого поколения. Пользуясь этим, можно применить прием дальнейшего построения хронологических шагов путем проведения под углом 45° диагонали от конца предыдущего хронологического шага до пересечения с экстраполируемой кривой. Точка пересечения примерно определит хронологический шаг очередного поколения бумагоделательных машин. Предполагаемое четвертое поколение, основанное на принципе кибернетизации бумагоделательных машин третьей стадии развития с формованием полотна между двумя сетками, просуществует примерно до 2005 года.

Качественная оценка рис. 74 подтверждает ситуацию, сложившуюся в настоящее время в целлюлозно-бумажной промышленности и свидетельствующую о переходном периоде к поискам и реализации принципиально новых идей, отражающих качественный скачок в ее развитии. Экспоненциальное сокращение лагов свидетельствует также о благотворном взаимном влиянии знаний, накопленных в различных видах деятельности человека. Однако это не означает, что решение современных задач науки и техники

в более короткие сроки упростилось, скорее наоборот: для этого требуются не только глубокие и разносторонние знания, которыми должны обладать специалисты и ученые, но и рациональная координация их действий в рамках различных специализированных коллективов, предназначенных для решения конкретных целевых задач.

Тем не менее, производительность труда как наиболее обобщенная характеристика уровня развития общества растет значительными темпами, причем они не только ускоряются во времени, но и в определенное время приведут к взрывообразной ситуации. Для этого, очевидно, потребуются сбалансированность уровня производительных сил и адекватный рост производительности у большинства народов, населяющих земной шар. Нечто подобное, хотя и в локальном плане, человечество уже претерпело во время промышленной революции, которая была обусловлена естественным ходом развития производительных сил и производственных отношений на определенном этапе существования общества. Тогда машины с присущей им высокой производительностью взяли на себя роль мускульной силы человека.

Другой характеристикой уровня развития общества, которая, как и последующие, является составной частью главного критерия — уровня производительности труда, служит уровень знаний, накопленных человечеством, на фоне роста общественного сознания. Характерно, что процесс накопления человечеством знаний имеет явно выраженный характер расширенного воспроизводства. Причем это не просто своеобразная сокровищница определенных ценностей. В этой деятельности человечества наиболее сконцентрировано и отчетливо проявляется борьба противоречий в процессе развития. Очевидно, причиной концентрации является сама сущность познания, т. е. процесса, который распознает неизвестное. Уровень же накопленных знаний служит основой для создания средств, позволяющих заменить функции человека в процессе его жизнедеятельности. Развитие орудий труда и средств производства, а также уровень энерговооруженности общества в конечном итоге определяют успех в решении этой задачи. Количественные и качественные показатели развития этого процесса, т. е. повышение уровня энерговооруженности общества, степени замены функций человека орудиями труда, подчиняются закономерностям, адекватным рассмотренным выше. Рост производительности труда и изменение уровня накопленных знаний представляют собой процесс, темпы развития которого все больше ускоряются.

Еще одной характеристикой уровня развития общества является возрастающая глобальность и ускорение темпов всех процессов жизнедеятельности человека. Мы уже иллюстрировали это сокращением лагов при разработке средств производства и при получении различных видов продукции в результате конкретной деятельности человека.

Таким образом, если учесть рост уровня знаний, ускорение темпов развития по существу всех областей деятельности человека,

а также глобальный характер этих процессов, охватывающих все большие площади земного шара, то это неизбежно приводит к адекватному росту эффективности деятельности людей. Если же рассмотреть эти слагаемые деятельности человечества как единое целое, можно увидеть, что в конечном счете быстрое действие созданных человеком систем машин (при условии, что задача управления ими решена на кибернетической основе) значительно превосходит физические возможности человека и скорость его логического мышления. Наконец, при глобальном характере течения указанных процессов в рамках человеческого общества это является объективной предпосылкой для создания условий взрывообразного роста производительности труда людей, населяющих земной шар. В этом по существу и заключается роль орудий труда в научно-техническом прогрессе.

Разумеется, подобные процессы должны совершенствоваться при наличии ограничений, накладываемых конкретными историческими условиями развития науки и техники и объективными условиями развития материального мира. Так, например, скорость передвижения имеет определенные ограничения: скорость передвижения в околоземном пространстве ограничена первой космической скоростью, в межпланетном пространстве — скоростью света. Однако очевидно, что нет предела росту уровня знаний.

Если с позиций сказанного попытаться дать оценку выявленных зависимостей развития технических систем, то очевидными становятся несколько важных положений. Первое: поэтапное развитие орудий труда является качественной характеристикой, глобально охватывающей все их виды. Второе: анализ качественных характеристик процессов развития технических систем различного рода выявляет хронологические периоды, в которые в небольшой отрезок времени происходили качественные скачки, что подтверждает принцип взаимообусловленности развития различных орудий труда. Смысл исторического анализа развития орудий труда заключается именно в установлении связей, влияющих на сам процесс развития и определяющих изменение их характеристик в будущем. Качественные изменения в технике происходят скачками, при эволюционности самого процесса развития, описываемого S-функциями. При этом новое зарождается в недрах существующего и становится эффективным на этапе, когда исчерпаны теоретические предельные возможности старого, и оно начинает отмирать.

Переход от предыдущей стадии к последующей есть элемент технического перевооружения. При широких масштабах его развития наступают условия для осуществления научно-технической революции, поскольку в ее основе должно лежать перевооружение, имеющее глобальный характер во всех сферах жизнедеятельности человека.

Характерно, что большинство рассмотренных выше технических систем достигли пределов своих возможностей уже в начале 40-х годов XX в. Назревала необходимость заменить их более прогрессивными видами. Но скачок произошел поздно — через 10—

15 лет. Вторая мировая война, стимулировавшая значительное развитие отдельных видов техники и вооружения, а также накопление научных знаний в военно-технической области, в целом не содействовала развитию техники. В годы войны человечество вынуждено было расходовать имеющиеся ресурсы на уничтожение. И только после 50-х годов были созданы объективные условия для реализации качественных показателей в развитии всех видов техники.

Познание закономерностей развития орудий труда дает возможность установить хронологические этапы смены поколений технических систем, а главное, оценить их качественное состояние в настоящее время и распознать грядущие изменения. Это значит, что можно определить рациональные направления исследований и поисков для своевременного создания усовершенствованных технических систем, параметры которых будут полностью использовать теоретические возможности реализуемого способа. Если они уже близки к предельным, то затраты средств и времени необходимо направлять на создание таких систем, которые будут принадлежать к последующей стадии развития.

Являясь орудиями труда, которые призваны замкнуть определенные функции человека со значительно более высоким быстродействием, технические системы обладают главным показателем, который интегрально оценивает, насколько успешно они выполняют предназначенные им функции. Таким показателем является эффективность в широком понимании этого слова.

Общая трактовка понятия «эффективность технической системы» включает аспекты технической и экономической эффективности, а также ряд показателей, характеризующих социальные аспекты функционирования системы. Точные критерии оценки параметров, определяющих эффективность функционирования систем, отсутствуют; их можно отнести к разряду условий, пригодных лишь для ориентировочной качественной оценки. Особенно это касается социальных аспектов при оценке технических систем.

Не имеет точных критериев оценки технического уровня технических систем и существующая практика управления качеством выпускаемой продукции. Все оборудование и все товары аттестуются эмпирическими категориями, положенными в основу системы аттестации продукции машиностроения и других отраслей на Знак качества или на присвоение соответствующих категорий качества, установленных Госстандартом СССР. Проблема разработки критериев оценки весьма актуальна и ждет научно обоснованного разрешения. Главным показателем функционирования технических систем — эффективность — служит основой для исследования закономерностей их развития. Чем более точной является оценка эффективности, тем точнее можно прогнозировать ее развитие в будущем с помощью аналитических моделей, созданных в настоящей монографии.

Если вернуться к этапам развития технических систем в зависимости от периода, описываемого S-функцией (активный или

затухающий участок), то надо отметить, что именно они являются основой для раскрытия как уровня эффективности создаваемых технических систем, так и их хронологического соответствия законам развития S-функции. Даже если учесть, что современные технические системы создаются на базе накопленного опыта, который рационально используется, то успех решения задачи определяется соотношением влияния прогрессивных и регрессивных факторов на данном этапе развития S-функции.

Если техническая система создается в период активного участка S-функции, когда превалирует влияние прогрессивных факторов, то в задачу ее создателей входит лишь рациональное использование научно-технических достижений, поскольку теоретические пределы еще не достигнуты. Однако объективно обусловленным является такое положение, когда возможности избранных методов иссякают и S-функция переходит в неактивную фазу. В это время возможности у создателей технических систем снижаются и, естественно, снижается эффективность создаваемых систем. Физически это проявляется даже во внешних признаках. Поскольку возможностей для интенсификации технических параметров становится все меньше по мере развития S-функции после ее активной части, всем создаваемым в этот период системам будут присущи черты гигантизма. Габаритные размеры растут, неадекватно увеличиваются затраты на создание и эксплуатацию, усложняются условия эксплуатации, снижаются сроки службы, показатели надежности и т. д. В конечном итоге все это естественно приводит к вырождению технических систем, реализующих данный метод. Поэтому примененный нами термин «гигантизм» следует понимать не как оценку габаритных размеров или масштабов, а скорее как непропорциональность, нарушение гармонического сочетания всех факторов, определяющих эффективность любой системы, в том числе технической. Неизбежный же при этом рост габаритных размеров является лишь внешним признаком хронологического развития, находящегося в затухающей части S-функции.

Следует отметить еще одно обстоятельство. Как показывает опыт, достоверные закономерности развития тех или иных технических систем можно определить, лишь располагая достаточными знаниями об их количественных и качественных характеристиках в прошлом. Дав критическую оценку этим характеристикам, специалисты, опираясь на закономерности развития систем, смогут определить их качественные показатели в будущем. Таким образом, главной методической основой прогнозирования все же является причинно-следственный анализ, который могут осуществить только специалисты, вооруженные знаниями в своей области. Прогнозы, построенные на основе интерполяции статистических данных отдельных параметров систем или их экспертной оценки, дают существенное искажение и низкую сходимость с фактическими результатами.

Вывод, который следует из оценки значения закономерностей

развития технических систем в период всеобъемлющего влияния научно-технического прогресса на все сферы общественного производства, заключается в следующем.

1. Закономерности развития технических систем могут широко использоваться при планировании и прогнозировании различных народнохозяйственных процессов.

2. Познание закономерностей развития обеспечивает рациональное использование потенциальных возможностей роста эффективности создаваемых систем в соответствии с хронологической активностью S-функции. Разработка прогнозов на этой основе позволяет установить расположение достигнутых параметров существующих систем на активной или затухающей части S-функции и определить перспективность этих систем. При этом крупномасштабное вовлечение ресурсов базируется на научной основе их распределения, со снижением факторов риска нерационального использования.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поскольку прогнозы развития орудий труда приобретают все большее значение в процессе планирования народнохозяйственной деятельности, соответственно повышаются и требования к точности прогнозов и плановых расчетов.

Высокая динамичность процессов, протекающих в современных условиях научно-технического прогресса, обуславливает необходимость строгих научных обоснований при прогнозировании, особенно на длительную перспективу. Это выдвигает на передний план попытки точнее смоделировать естественные процессы, упростив их в допустимых пределах, с тем чтобы, пользуясь такими моделями, можно было с помощью вычислительной техники проводить многовариантные расчеты. Самой же лучшей моделью естественно развивающегося процесса является та, которая построена на базе объективных закономерностей развития, если они познаны и трансформированы в аналитическую зависимость.

5.1. Общие принципы

Успешное решение задач прогнозирования развития технических систем, независимо от уровня прогнозирования (в масштабах государства, отрасли, предприятия или еще более локальных задач), зависит прежде всего от научной обоснованности самого метода решения. Если имеется достаточно оснований для установления закономерности изменения прогнозируемого процесса, то решение задачи значительно облегчается. При этом чем более отдаленный отрезок времени охватывается прогнозированием, тем более важно знать закономерности развития.

Рассмотренные в предыдущих главах теоретические основы объективных закономерностей развития технических систем, а также конкретные примеры их апробирования на основе обработки статистических данных развития орудий труда, других систем позволяют установить несколько общих принципов, которые должны быть положены в основу при составлении прогноза развития любой технической или нетехнической системы. Эти общие принципы необходимо строго соблюдать.

Прежде всего рассматриваемый метод научно-технического прогнозирования является методом моделирования. Известно, что он предпочтительнее других, однако он имеет серьезный недостаток,

который заключается в трудности получения самой модели. Если у исследователя имеется модель, которая с достаточной степенью точности отображает закономерности, свойственные процессу функционирования реальной системы, то результаты прогноза будут значительно лучше согласоваться с фактическими показателями, чем полученные методом экспертных оценок или методом экстраполяции тенденций.

Для того чтобы используемая модель была «привязана» к процессу развития действующей системы, исследователь должен быть убежден в том, что моделируемые и реально существующие процессы синхронизированы во времени. Для этого в арсенале исследователя должно быть необходимое и достаточное количество статистических данных развития реальной системы, которые определяли бы факт существования ее как таковой и по которым можно было бы установить реально существующие закономерности изменения параметров прогнозируемой системы в ретроспективном плане. При этом в процессе составления модели реально существующей системы важно выявить факторы взаимодействия ее с внешней средой. Хотя эта задача в общем плане не разрешима из-за сложности и чрезвычайной разнообразности факторов, воздействие которых на систему не поддается описанию, необходимо учитывать результаты взаимного влияния системы и среды хотя бы в приближенном виде.

Чтобы сформулировать общие принципы предлагаемого метода прогнозирования технических систем с помощью S-функции, снова укажем некоторые важные его особенности.

1. В процессе развития любой технической системы происходит последовательное поэтапное изменение ее параметров. Достижение новых параметров обеспечивается соответствующими конструкциями, которые независимо от степени совершенства должны обладать основными признаками и характеристиками, отражающими особенности развития всей совокупности технических систем данного вида как некоторого семейства. Накопленный опыт эксплуатации представителей этого семейства служит базой для создания более совершенных, а в некотором периоде развития и качественно новых систем.

2. Количество стадий развития технической системы соответствует условию $N=1+n$, где $n=0, 1, 2, 3 \dots$. Закономерности развития параметров в пределах одной стадии описываются S-функцией, рост которой по оси ординат ограничен пределом, регламентирующим теоретические возможности реализуемого метода, положенного в основу создания технической системы.

Реально это обусловлено одновременным воздействием на процесс развития технической системы прогрессивных и регрессивных факторов, степень воздействия которых во времени обуславливает S-образную форму кривой. По мере исчерпания теоретических возможностей метода, реализуемого технической системой, прогрессивность процесса замедляется, и теоретически обусловлено приближение его параметров к пределу каждой стадии развития по асимптоте.

3. Объективные законы развития обуславливают поиски новых, более совершенных решений задолго до того, как реально развивающийся процесс перестает быть перспективным. Поскольку в недрах каждой предыдущей стадии зарождаются качественно новые решения, они до определенного времени не являются конкурентоспособными, но в своей основе содержат потенциальные возможности, значительно превосходящие показатели той стадии, в недрах которой они зародились.

Такой метод прогнозирования является наиболее приемлемым с научной точки зрения, поскольку альтернативной базы, способной объяснять и распознавать причины и следствия, а значит, и закономерности развития технических систем, не существует.

Рассмотрим общие принципы метода прогнозирования развития технических систем с помощью S-функций.

1. Неограниченное многостадийное развитие исследуемых параметров технических систем во времени и предельное в каждой стадии (ограниченное теоретическим пределом).

Теоретические пределы возможностей каждой стадии развития были объяснены выше; их всегда можно рассчитать. Что же касается неограниченности развития исследуемых параметров технической системы во времени, то это утверждение справедливо даже в том случае, когда исследуемый процесс происходит в пределах одной, а точнее, первой стадии при любой ее длительности, т. е. когда приближение параметров реально существующих систем к теоретическим пределам осуществляется асимптотически, а значит, во времени бесконечно.

Если процесс многостадийный, то практический интерес к поколению технических систем предыдущей стадии теряет смысл после того, как произойдет качественный скачок в развитии, т. е. переход от предыдущей стадии к последующей. На практике, безусловно, всегда имеет место использование представителей поколения технических систем предыдущей стадии, когда уже главенствуют представители последующей. Но это объясняется лишь технико-экономическими соображениями, связанными с эффективностью их эксплуатации или с необходимостью иметь определенное время для смены поколений тех или иных систем.

2. Развитие закономерностей имеет только непрерывный и только прогрессивный характер.

Принцип непрерывности обусловлен объективными законами развития материи. Для исследования любого процесса развития необходимо учитывать только обычные условия, без влияния форс-мажорных обстоятельств. Например, если прогнозируется развитие какой-либо системы в пределах одного государства, нельзя считать корректными условия развития такой системы при наличии обстоятельств, которые могут искусственно задерживать процесс; мировые тенденции развития этих систем останутся неизменными. Прогрессивность же развития закономерностей обусловлена природой движения материи и принципом мышления человека, который, никогда не довольствуясь достигнутым, стремится создать бо-

лее совершенные по сравнению с имеющимися системы. Деградация не является признаком развития технических систем.

3. Полное соответствие прогнозируемого процесса закону неравномерности развития при последовательном и постадийном его изменении.

Этот принцип для синтезированных человеком технических систем обусловлен выявленными закономерностями развития. Самая важная особенность их заключается в принципе постадийного развития. Но поскольку этот процесс, как и развитие материи вообще, обусловлен объективными законами, в основе которых лежит принцип неравномерности развития, то и любая техническая система не может не обладать этими качествами. Наглядно это выражается S-образной формой развития параметров в каждой стадии.

4. Наличие необходимого и достаточного количества достоверных статистических данных, отображающих ретроспективное развитие технической системы.

Условие необходимости и достаточности статистических данных было изложено в гл. 3. Здесь же отметим, что без наличия таких данных прогнозирование по предлагаемому методу теряет смысл, поскольку статистические данные, достоверно отражающие свершившиеся факты, являются единственной возможностью для синхронизации во времени процесса развития системы и созданной исследователями модели. Главное же, они несут в себе качественные и количественные признаки самого процесса развития исследуемой системы.

5. Использование только явно выраженных тенденций с исключением нехарактерных статистических данных.

Этот принцип обуславливает необходимость проведения процесса прогнозирования только специалистами в области исследуемых технических систем. Например, необходимо исключать статистические данные, которые относятся к новому поколению, зарождающемуся в недрах существующего. Если не исключить такие некорректные статистические данные, то и сам процесс прогнозирования будет некорректен. Исключить же их могут только специалисты в области исследуемых технических систем, способные на основе причинно-следственного анализа установить некорректность данных для процесса прогнозирования.

К некорректным необходимо также отнести статистические данные, полученные от реализации технических систем, параметры которых заведомо не соответствуют научно-техническим достижениям своего времени. К ним относятся и статистические данные, принадлежащие системам, которые не являются эффективными по технико-экономическим показателям, однако, будучи созданы для каких-то специальных целей, обладают некоторыми показателями, значительно превосходящими параметры статистического массива.

На основе этих пяти общих принципов развития технических систем с помощью S-функций можно приступить к решению практических задач процедуры прогнозирования.

5.2. Выбор главного параметра

Технические системы, как правило, предназначены для реализации какого-либо технологического процесса и являются средством для получения продукции, энергии или применяются для научных целей и т. п. Если рассматривать их как орудия труда, то, как уже было отмечено, им принадлежат вторичные функции в структуре любого производства, поскольку основой его является технологический процесс.

Ранее уже отмечалось, что для удобства исследований процесса развития технических систем целесообразно воспользоваться их общими или частными показателями в зависимости от целевой установки, принятой в конкретном исследовании. Как правило, целесообразно иметь дело с главным параметром технической системы как интегральным показателем, наиболее полно характеризующим избранный объект исследования. Выбор главного параметра можно осуществить, лишь определив сам метод, который положен в основу реализации технологического процесса, в соответствии с классификацией, приведенной в гл. 1 (см. рис. 3—5).

Подбирая статистические данные главных параметров, принадлежащих отдельным техническим системам, функционировавшим в различное время, необходимо прежде всего убедиться, что они относятся именно к той общности или совокупности технических систем, которые представляют их семейство, принадлежащее к данной стадии развития. Это значит, что они должны реализовать один и тот же метод технологического процесса.

Здесь необходимо отметить, что для любой технической системы характерны изменения не только главных параметров, но и других показателей, отражающих частные стороны процесса их развития. Например, для паровых турбин главным параметром является мощность. Однако такие параметры, как удельная металлоемкость, коэффициент полезного действия, температура пара как основного энергоносителя, также изменяются в зависимости от степени совершенства конструкций этих энергетических систем. Можно заранее предвидеть закономерности их изменения, аналогичные закономерностям изменения главного параметра, поскольку, являясь частными компонентами такого интегрального показателя, как производительность, они должны обладать общими признаками. Однако не только их жесткая взаимосвязь проявляется в процессе изменения частных показателей и обобщенного показателя в пределах одной технической системы. Это обусловлено влиянием более высокого порядка, когда любая техническая система как объективная реальность взаимодействует с другими системами, относящимися к смежным отраслям техники, производства, т. е. влиянием научных достижений в целом.

Когда мы рассматривали закономерности изменения параметров бумагоделательной машины, то подтверждение этого тезиса было получено при установлении закономерности изменения ее производительности, скорости, ширины. Для определения путей

рационального развития, например, отрасли целлюлозно-бумажной промышленности в целом исследуемыми параметрами могут быть единичные мощности отдельных производственных подразделений, мощности предприятий, производительность труда или выработка продукции на одного работающего на предприятии. Исходной концепцией в данном случае является все та же взаимосвязь выбранных параметров: изменение одного из них сказывается на развитии других, так же, как это изменение зависит от достижений смежных отраслей техники и промышленности в целом.

Например, при анализе изменения важного показателя регулируемого электропривода бумагоделательных машин — точности регулирования — мощность является вторичным показателем с точки зрения характеристики качества электропривода. Выше было показано, что по мере роста скорости машины все большие требования предъявлялись к точности регулирования соотношения скоростей между ее секциями, а это непосредственно сказывалось на качественных показателях электропривода. Они (в первую очередь точность регулирования) зависели от уровня достижений электротехники, в том числе электротехнической, электронной промышленности, средств автоматизации и т. п. История развития регулируемого электропривода является характерным примером, когда активно использовались лучшие достижения перечисленных областей науки и техники. Например, на заре развития регулируемого электропривода применялись электромашинные усилители, которые могли лишь до известной степени удовлетворять потребностям электроприводов в смысле точности регулирования, а главное, снижения инерционности, присущей этим усилителям. Поэтому по мере роста скорости они становились препятствием в обеспечении устойчивой работы бумагоделательных машин. Как только появились электромагнитные регуляторы, они были использованы в электроприводе бумагоделательных машин и обеспечили известный рост скорости, поскольку не имели недостатка, присущего электромашинным усилителям. С появлением тиристорных преобразователей у электропривода бумагоделательной машины открылись новые возможности качественного роста в смысле повышения точности регулирования. В настоящее время возможности тиристорных преобразователей еще далеко не исчерпаны; они могут обеспечить устойчивую работу приводов при росте скорости бумагоделательных машин по крайней мере до 1,5—2 тыс. м/мин.

Отметим, что, выбрав предметом исследований конкретный параметр технических систем, не являющийся главным, необходимо помнить, что обособленный анализ такого параметра без учета причин и следствий влияния на него других параметров, а также достижений науки и техники в целом был бы ошибочным.

Таким образом, выбор главного параметра технической системы, отображающего сущность ее развития, является важным этапом научно-технического прогнозирования.

Собирая статистические данные по изменению выбранных параметров технических систем во времени, специалисты на этом этапе прогнозирования должны считать корректными не только те данные, численные значения которых близки друг к другу, но и те, которые значительно отличаются в большую или меньшую сторону. Критический анализ их принадлежности к той или иной стадии развития исследуемой системы, а также правомерности их включения в массив для аппроксимации S-функциями выполняется на следующем этапе, когда устанавливают не только значения каждого параметра, но и его принадлежность к той или иной стадии развития путем проведения причинно-следственного анализа.

5.3. Причинно-следственный анализ развития параметров

Основная задача на этом этапе прогнозирования заключается в определении количества стадий, имевших место в ретроспективе развития исследуемой технической системы. Даже предварительный анализ изменения статистических данных может дать общую картину для определения количества стадий развития. По крайней мере, можно сразу определить многостадийность исследуемого процесса.

Анализируя кривые рис. 11 и 21, можем легко установить, что процесс развития этих систем не является одностадийным. В то же время такой же предварительный анализ статистических данных, изображенных на рис. 46 и 64, свидетельствует об одностадийности (вернее, о первой стадии) изображенных здесь процессов развития. Разумеется, такие выводы могут сделать только специалисты, хорошо владеющие теорией и практикой создания и эксплуатации соответствующих технических систем.

Когда установлен факт существования в ретроспективном плане одной или нескольких стадий, необходимо выявить причины и следствия, приведшие к качественным изменениям процесса развития исследуемого параметра. Априори полагая, что изменение идет по S-образной кривой в пределах одной стадии, необходимо выделить группы воздействующих факторов, которые систематизируются отдельно как прогрессивные и регрессивные. Поскольку в ходе развития степень их влияния на исследуемый процесс различна, то на первоначальной стадии группирование по признаку прогрессивности или регрессивности ведут без учета степени их воздействия.

В идеальном случае при причинно-следственном анализе развития исследуемого процесса желательно учитывать все выявленные факторы. Однако с целью упрощения самой процедуры и снижения трудоемкости процесса прогнозирования можно исключить некоторые маловажные факторы в зависимости от целевой установки по степени точности получения прогноза.

Возьмем для примера выбор прогрессивных и регрессивных факторов, воздействующих на процесс изменения ширины бумагоделательных машин во времени. Поскольку основные рабочие органы этих технических систем, как говорилось выше, представляют собой двухопорные тела вращения и расстояние между их подшипниками прямо пропорционально влияет на рост производительности бумагоделательных машин, то сам параметр ширины является прогрессивным фактором.

К этой группе относятся такие факторы, как прочность, долговечность, износостойкость металлов и сплавов, а также других материалов, используемых в конструкциях бумагоделательных машин. Такие же факторы одновременно воздействуют на составные части рабочих органов, например на подшипниковые узлы. Качество подшипников, их технические параметры, вспомогательные материалы (например, смазочные масла) также требуют тщательного анализа, чтобы для каждой конкретной системы мы могли отнести их в группу прогрессивных или регрессивных. Обратим внимание на то, что все вышеобозначенные факторы, в данном случае отнесенные нами к разряду прогрессивных, не всегда могут быть таковыми, если рассматривать этот процесс в пределах большого периода развития. Это скорее характерно для каждой конкретной технической системы, анализируемой при прогнозировании, а не для их семейства в целом. В самом деле, применяемые для какой-то определенной ширины металлы и сплавы в конструкциях тех же рабочих органов бумагоделательных машин могут вполне удовлетворять техническим требованиям, предъявляемым только к данной конструкции. Но при изменении степени нагружения рабочего органа, даже без увеличения ширины, а тем более при ее увеличении, этот прогрессивный фактор может перейти в группу регрессивных, если технические характеристики данного материала не обеспечивают восприятия растущих нагрузок.

К явно выраженным регрессивным факторам в данном случае можно отнести параметр поперечной жесткости рабочих органов бумагоделательных машин, которая нелинейно меняется по мере увеличения расстояния между опорами, что приводит к резкому увеличению их массы при конструктивном оформлении. Эти же причины вызывают и другие отрицательные явления, например увеличение поперечных размеров тел вращения, не говоря уже о чисто конструктивных трудностях, возникающих при изготовлении и эксплуатации. Это резко удорожает стоимость конструкций.

Другим характерным регрессивным фактором следует считать производственные возможности заводов — изготовителей бумагоделательных машин. Каждое машиностроительное предприятие, изготавливающее их, оснащено станочным оборудованием, лимитирующим габаритные размеры обрабатываемых деталей, а это является ограничивающим фактором. Можно, конечно, заменить такие станки новыми, с большими возможностями, но это связано с затратами труда, времени, с капиталовложениями. Если же речь идет не о единичных, а о более масштабных заменах, этот фактор

превращается в подлинное препятствие, поскольку он влечет за собой сложные процессы изменения технологии изготовления при изменении планировки и номенклатуры не только оборудования, но и вспомогательных систем, которые обслуживают производство, специальных контрольно-мерительных приспособлений и т. д.

Приведенный, казалось бы, простой пример свидетельствует о многофакторности воздействия на исследуемый процесс развития и взаимной обусловленности влияния многих компонентов, не относящихся прямо к конструкции или параметрам исследуемой технической системы. Однако в данном случае нас интересует качественная сторона. Какие причины обусловили изменение исследуемого параметра в малых или больших промежутках времени, даже в пределах одной стадии, и каковы следствия, оказавшие влияние на процесс усовершенствования, — а именно о нем идет речь — вопрос, разрешить который под силу только специалистам.

Очень важно избегать при анализе факторов, не отражающих общих тенденций. Характерным примером такого случая является кривая изменения ширины отечественных бумагоделательных машин (см. рис. 22, В). Как бы тщательно мы ни исследовали процессы, влияющие на ход развития этого параметра, для отечественных бумагоделательных машин такая постановка не может быть корректной потому, что условия, в которых шло это развитие, являются частным случаем и ни в какой отрезок времени не вписываются в общую тенденцию развития данного параметра в общемировом плане. Уже говорилось, что отечественные бумагоделательные машины по существу до 1960 г. не могли отвечать научно-техническим достижениям, потому что до этого времени в Советском Союзе практически не было целлюлозно-бумажного машиностроения. На некоторых заводах изготавливались лишь запасные части и небольшие бумагоделательные машины, причем мировой технический уровень значительно опережал уровень машин, изготовлявшихся в Советском Союзе. Естественно, при этих условиях ширина отечественных бумагоделательных машин не может отражать общемировые тенденции. Поэтому если, не проанализировав статистические данные, на основе которых построена кривая, принять их как корректные и сделать прогноз развития ширины отечественных бумагоделательных машин, хотя бы путем линейной экстраполяции кривой (см. рис. 22), это будет явно ошибочно, поскольку темпы роста ширины отечественных бумагоделательных машин уже в 1960—1970 гг. значительно превысят общемировые. Этого, естественно, не произошло. Увеличение ширины бумагоделательной машины, как уже было показано, задача чрезвычайно трудная. В современных условиях развития техники и технологии машиностроительного производства не удастся преодолеть 10-метровый барьер из-за ограниченности прочностных и других технических показателей применяемых материалов.

Наконец, возможная ошибка при проведении причинно-следственного анализа развития исследуемого параметра технических систем — недостаточно строгий отбор статистических данных. Эти

данные должны относиться именно к исследуемой совокупности технических систем. Если этот принцип нарушен, то невозможно правильно определить количество стадий развития и, разумеется, их качественные показатели.

Например, использованные при анализе изменения скорости бумагоделательных машин в гл. 3 статистические данные строго соответствуют одному методу — НВГО. Аналогичные параметры машин, реализующих другие методы производства целлюлозно-бумажной продукции, в данном случае исключены как некорректные. Неверно было бы использовать данные разных методов, например изменение производительности варочных котлов периодического и непрерывного действия. Для специалиста очевидно, что они реализуют два различных технологических процесса и потому не имеют ничего общего.

Наконец, при анализе отобранного массива статистических данных следует исключить из процесса аппроксимации их S-функцией такие, которые относятся к зарождающейся новой стадии и базируются на качественно новых принципах реализации технологического процесса. Графически они, как правило, дислоцируются на завершающей части каждой стадии развития, и до определенного времени численные показатели их ниже, чем у технических систем, принадлежащих к исследуемой стадии. Такие данные следует исключать, так же, как и статистические данные, значительно превышающие показатели эксплуатируемых технических систем на данном отрезке времени, если они принадлежат к каким-то системам, созданным для специальной целевой установки. Например, можно создать бумагоделательную машину, значительно превосходящую по скорости лучшие достижения, имеющиеся в промышленности. Но при этом, как показывают расчеты, стоимость такой машины будет неадекватно расти по сравнению с ростом производительности; поэтому технико-экономическая эффективность таких машин будет более низкой.

На рис. 41 показан результат проектных расчетов, преследующих цель повышения производительности бумагоделательных машин за счет разных факторов. Анализируя технико-экономические аспекты каждого способа, нужно избрать наиболее эффективный. Он будет результатом интегрального подхода к достижению поставленной цели. Однако при этом требуется тщательный анализ других возможных в реальных условиях путей. Как правило, это — компромисс, в котором решают качественные показатели наиболее рационального пути. В данном случае согласно рис. 41 предпочтительным оказывается повышение скорости, а не ширины бумагоделательных машин, хотя этот путь нелегко реализовать, он сопряжен с большими техническими и экономическими трудностями. Таким образом, в массиве статистических данных в итоге должны оставаться лишь параметры, принадлежащие к конкретным техническим системам, реализующим определенный технологический метод в пределах каждой стадии. Сумма этих статистических данных в таком случае будет отражать общие тенденции развития их совокупности во времени.

5.4. Математическая интерпретация статистических данных развития

В задачу предыдущих этапов прогнозирования развития параметров технических систем входили вопросы детерминированной оценки статистических данных ретроспективного периода развития конкретной системы, т. е. выявление количества стадий и их качественная оценка путем причинно-следственного анализа. Результаты этой работы позволяют сделать выводы о развитии исследуемого процесса. Для специалистов становятся ясны тенденции дальнейшего развития даже без дополнительной инструментальной обработки массива статистических данных, особенно если оцениваются тенденции развития исследуемого процесса за небольшой промежуток времени.

Чтобы иметь представление не только о ближайшем, но и об относительно отдаленном будущем, необходимы более точные методы аппроксимации статистических данных с помощью построения математической модели исследуемого процесса. Эта модель представляет собой уравнение S-функции, теоретические обоснования которого даны в гл. 3. На данном этапе с помощью математического выражения S-функции аппроксимируются статистические данные, отобранные для исследования. Цель этой процедуры — отыскание инструмента для прогноза исследуемого параметра в пределах одной — текущей или будущей — стадии развития.

Разумеется, что при отсутствии необходимого и достаточного количества статистических данных невозможно достоверно предсказать сам факт зарождения новой стадии развития. Однако такая ситуация, как правило, бывает тогда, когда общая активность текущей стадии достаточно велика, теоретические возможности исследуемого метода еще не исчерпаны и не возникло особой необходимости в исследовании процессов, которые будут присущи следующей стадии развития. Но и в этом случае самым важным и ценным является то, что развитие идет в активной фазе S-функции, и нужно использовать все достижения науки и техники, чтобы обеспечить оптимальное соответствие технических параметров исследуемых систем теоретическим возможностям той стадии развития, к которой они принадлежат. Выражение для обработки статистических данных изменения исследуемых параметров больших технических систем представляет собой уже известную S-функцию:

$$y = L / (a + e^{be^{-\beta t}}).$$

Если мы располагаем небольшим количеством достоверных данных, распределенных во времени развития одной или нескольких стадий, то обработка их с помощью этого уравнения может быть произведена и вручную. Однако, как правило, статистические

данные бывают представлены в значительных количествах, и для удобства и повышения точности их аппроксимацию производят с помощью ЭВМ.

Для ЭВМ ЕС-1020 на языке PL/1 разработана блок-схема, которая является средством реализации алгоритма метода наименьших квадратов для вычисления коэффициентов L , a , b , β (рис. 75) [48]. Значения коэффициентов определяют по статистическим данным и вводят в программу как исходные величины. Программа включает четыре функциональных блока:

- головную программу;
- подпрограмму логарифмирования;
- подпрограмму обращения матриц;
- блок вывода результатов вычисления.

Приведенная на рис. 75 программа позволяет вводить статистический массив, содержащий до 90 элементов. Таблица выходных данных содержит значения исходных массивов с распределением статистических данных по годам, а также значения параметров L , a , b , β для различных периодов времени с начала отсчета, равного t_0 , которое определяют для каждой стадии отдельно. При необходимости могут быть составлены подобные программы для обработки на других ЭВМ.

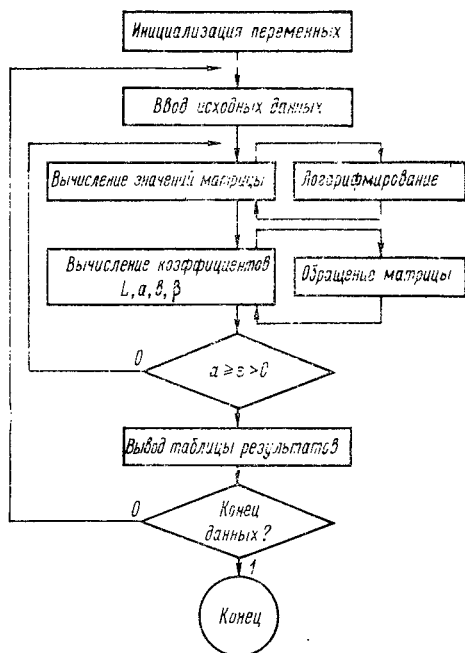


Рис. 75. Блок-схема алгоритма обработки статистических данных с помощью S-функций

5.5. Оформление результатов прогноза и выводы

Поскольку этот этап является результирующим в работе по прогнозированию развития исследуемых систем, он должен быть оформлен соответствующим образом и включать в себя следующие разделы.

1. Постановка задачи. В этом разделе формируется цель проводимого исследования и дается краткое описание общей и частных задач, решение которых обеспечивает достижение цели. Если одновременно исследуется не один параметр технической системы,

а несколько характеризующих ее частных аспектов, то для каждого из них следует оформлять такой раздел.

2. Определение метода реализации технологического процесса. Здесь обосновывается принадлежность всего массива статистических данных, выбранных для исследования, к одному и тому же методу реализации техническими системами технологического процесса. Указываются причины, по которым исключаются статистические данные, не представляющие интереса для исследования, формулируется метод реализации технологического процесса исследуемых систем.

3. Причинно-следственный анализ развития исследуемого параметра. Как уже было сказано, несмотря на то что в зависимости от постановки задачи для прогнозирования целесообразно выбирать главный или частные параметры технических систем как наиболее удобное отображение их показателей и свойств, при причинно-следственном анализе рассматривается весь комплекс воздействующих факторов, степень их воздействия и результаты, к которым это приводит в процессе развития исследуемого параметра во времени. Следует еще раз подчеркнуть, что эта задача может решаться только квалифицированными специалистами, поскольку этот раздел по существу является самым важным в определении количества стадий развития и их качественных характеристик.

4. Сводная таблица статистических данных. Таблица является результатом трех предыдущих разделов, которые обеспечивают наличие необходимого и достаточного для исследования количества статистических данных, их достоверность. Таким образом создается база для инструментального решения задач прогнозирования в дальнейшем. Количество статистических данных, отбираемых для включения в таблицу, колеблется: чем их больше, тем лучше. Однако достаточно и небольшого количества (иногда в пределах десяти). Важнейшим является достоверность данных, а она может быть подтверждена лишь тем, что отобранные данные однородны для всего массива и в совокупности определяют качественные и количественные характеристики, имеющие место в последующем периоде развития технических систем.

5. Составление алгоритма программы и формулы S-функции. Этот раздел представляет собой процедурную часть, относящуюся к непосредственной аппроксимации статистических данных. Если по каким-либо причинам не подходит программа, приведенная на рис. 77, то необходимо составить более удобную для имеющихся вычислительных машин. Оформление этого раздела производится по общепринятым формам, которые могут также быть произвольными.

6. Машинная распечатка и графическое оформление полученной закономерности. В этот раздел включается как документальное подтверждение решения поставленной задачи перфолента с машинной распечаткой, итоговые данные которой берутся за основу построения графика S-функции. В отличие от предыдущих,

этот раздел уже прямо отвечает поставленной цели, поскольку цифровое и графическое изображение его включает не только ретроспективные закономерности развития, но и их прогноз в пределах текущей или последующей стадии, основанный на свойствах S-функций. По существу этим разделом заканчивается процедурная часть прогнозирования. Полученные данные служат основой для их количественной и качественной оценки, которая и является главным результатом прогнозирования.

7. Анализ полученных результатов и выводы. Этот этап прогнозирования требует серьезного осмысления полученных результатов не только специалистами в области исследуемых технических систем, но и экономистами и другими специалистами, связанными с управлением отраслью народного хозяйства, к которой принадлежит исследуемые системы.

Поскольку полученные количественные показатели прогнозируемого параметра рассчитаны на основе аппроксимации статистических данных S-функциями, количество, качество и достоверность которых установлены специалистами, эти результаты не только могут конкурировать с любыми субъективными представлениями развития исследуемого процесса в будущем, но должны служить основой для коррекции представлений специалистов, которые всегда базируются на субъективной оценке развития исследуемого процесса.

Важно, что прогнозируемый таким образом ход развития исследуемого процесса показывает наиболее рациональный путь, который может быть реализован, если сполна использовать имеющиеся для этого научно-технические возможности. Цель в конечном счете заключается в достижении оптимальной эффективности функционирования исследуемых технических систем. Необходимо также рассматривать те аспекты, которые на первый взгляд выглядят искусственными, но представляют большой интерес, и в случае успешной их реализации могут стать основой для зарождения и формирования новой стадии развития исследуемых систем. Конкретно это можно пояснить на таком примере.

Если результаты прогноза показывают, что S-функция последней стадии исследуемой системы на момент исследования находится в затухающей части, то объективно обусловлен и экстенсивный путь роста ее параметров в дальнейшем. Наиболее эффективным отрезком S-функции в этом смысле является линия активного участка (см. рис. 42).

Эта ситуация имеет два аспекта. С одной стороны, специалисты могут быть уверены в том, что научно-технические достижения, если они правильно и полно использованы, обеспечат соответствие параметров создаваемых систем тем параметрам, которые прогнозированы с помощью S-функции. Другими словами, таким образом исключается прожектерский подход или стремление выдать желаемое за действительное. С другой стороны, если количественные и качественные показатели развития не могут удовлетворить потребности народного хозяйства, когда процесс развития находится

в затухающей части S-функции, то специалисты должны воспринять это как сигнал для активного поиска других, принципиально новых и более прогрессивных методов решения поставленной задачи. Обеспечить переход развития в новую, более прогрессивную стадию с наименьшими потерями времени становится в этой ситуации главной задачей. Если специалисты не будут вооружены такими знаниями, они не смогут вовремя заняться разработками, которые обеспечили бы интенсивное развитие создаваемых ими технических систем. В этом преимущество прогнозирования с помощью S-функции перед любыми другими, которыми пользуются в настоящее время. Так, например, анализ результатов прогноза развития скорости бумагоделательных машин (см. рис. 44) показывает, что через 20--25 лет этот параметр попадет в затухающую часть кривой и темпы развития не будут адекватны народнохозяйственным задачам. Таким образом, уже сейчас имеет смысл проводить масштабные поисковые работы в направлении создания новых, более совершенных конструкций бумагоделательных машин, которые будут принадлежать следующей стадии развития. Главное же, в основу реализации технологии производства бумаги должен быть положен новый, более производительный метод, чем НВГО.

Если процесс развития находится в активной части S-функции, то в задачу исследователей, занимающихся прогнозом, и специалистов, разрабатывающих такие системы, входит рациональное использование завоеваний науки и техники для достижения тех параметров, которые определены при построении S-функции развития. Характерным примером такой ситуации в развитии технических систем является вторая (см. рис. 63) или третья (см. рис. 57) стадия.

Сопоставив, с одной стороны, реально достижимые полученные прогнозом количественные показатели развития и объем затрат, который потребуются для этого, а с другой — экономические и технические возможности, всегда можно найти рациональный путь решения задачи. Это невозможно было бы сделать, не располагая данными научно-технического прогнозирования, которые исследователи могут получить только при выявлении объективных закономерностей развития технических систем.

РАЗВИТИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Являясь базовой группой отраслей народного хозяйства, машиностроительный комплекс во многом определяет его эффективность и темпы развития. Однако и сам машиностроительный комплекс претерпевает соответствующие изменения во времени. Эти изменения очень сложны, масштабны и взаимосвязаны с процессами развития других отраслей народного хозяйства. Описать их простыми или сложными аналитическими зависимостями невозможно без больших, а иногда и недопустимых упрощений. Вместе с тем знать пути развития машиностроения очень важно. Теперь для этого есть некоторые основания в виде выявленных закономерностей развития технических систем, составляющих базу машиностроительного комплекса; это уже может служить серьезной основой для анализа процессов его развития.

6.1. Период экстенсивного развития

В предыдущих главах были выявлены некоторые закономерности развития технических систем на примерах, взятых из различных отраслей промышленности. Поскольку эти закономерности оказались общими для всех рассмотренных случаев, это позволяет предположить, что подобные или какие-то другие закономерности присущи и целым отраслям народного хозяйства, материальная база которых представляет собой совокупность более или менее однородных видов машин, механизмов, технических систем.

В самом деле, когда были изобретены первые машины, заменившие физический труд человека, оказалось возможным не только использовать их каждую в отдельности, но и составлять из них отдельные совокупности, которые позволяли осуществлять целые технологические процессы механизированным путем. Однако в таких механизированных комплексах за человеком оставалась роль управления каждой машиной в отдельности.

Использование машин для выполнения основных и вспомогательных операций, а также комбинации их с рабочими местами, где использовался ручной немеханизированный труд, стали основой для формирования целых производств, фабрик, заводов, — т. е. появилась возможность производить самые различные товары промышленным путем.

Производительность таких комплексов зависела от объективных и субъективных причин. Объективные причины заключались

в том, что для различных видов производства предназначались различные технологические процессы. Каждый из них характеризовался либо дискретностью, либо непрерывностью. Немаловажную роль играла, естественно, и степень технического совершенства применявшихся машин и механизмов. Дискретные процессы сопряжены с неизбежными потерями времени на технологические перерывы и связанными с этим трудностями рациональной организации производства. В непрерывных были заложены большие возможности для реализации высокого уровня производительности. Если имело место удачное сочетание этих факторов, т. е. осуществлялся непрерывный процесс и машины, предназначенные для его реализации, обладали высокими техническими показателями, то процесс производства был высокопроизводительным и при этом максимально использовались его потенциальные возможности.

Но на производительность таких комплексов влияли и субъективные причины. Они заключались в умении каждого рабочего наиболее рационально и правильно, а значит умело, управлять машинами. Здесь все зависело от индивидуальных способностей каждого рабочего, от его навыков и накопленного опыта.

Указанные признаки характеризуют период экстенсивного развития промышленности, когда производительность заводов, фабрик зависела в основном от количества применявшихся машин и механизмов, от их рациональной компоновки в технологических планировках промышленных предприятий.

Естественно, что рост технического уровня, степень совершенства каждой из машин влиял на рост производительности труда и на производительность промышленного производства в целом.

Промышленное производство революционизировало качественные характеристики процесса труда, высокие темпы роста которых при ремесленном и мануфактурном способах производства не могли быть достигнуты. Признаки промышленной революции, базирующейся на этих началах, быстро охватили различные отрасли промышленности. Особенно показательными явились такие, для которых характерны непрерывные процессы технологии производства.

Отметим, что бурное развитие промышленного производства обязано прежде всего развитию его базисной части, т. е. производству средств производства. Именно такой базисной частью промышленного производства является машиностроение, которому, как и любой совокупности технических систем, виду производства или отрасли промышленности, свойственны те же самые закономерности развития. Благодаря машиностроительному комплексу быстро развивались другие отрасли промышленности, потому что они использовали его продукцию — различные машины и механизмы. Само же машиностроение претерпело трудное и не очень динамичное развитие, прежде всего потому что в его основе лежат дискретные технологические процессы. Они проявлялись во всем: в конструировании отдельными людьми тех или иных машин

и механизмов; в разработке последовательных во времени этапов технологического проектирования; в изготовлении отдельных деталей, из которых потом составлялись конструкции машин и механизмов и т. д. Сам процесс изготовления деталей в машиностроении также дискретен, он требует осуществления многих сложных технологических операций. Дискретными были и остаются процессы сборки машин.

Вместе с тем многие машины, которые изготовлялись на предприятиях машиностроительного комплекса, обладали, как правило, большой производительностью, особенно если они осуществляли непрерывные технологические процессы. Однако сами машиностроительные заводы имеют в своем составе мало производств с непрерывными технологическими процессами. Наиболее показательна в этом отношении базисная отрасль машиностроения — станкостроительная промышленность. Именно ее продукция является средствами производства, которые предназначены для создания характерному представителю машиностроительной промышленности присущи все закономерности ее развития.

Специализация машин и механизмов различных станков по технологическим переделам и внутри них в этой отрасли очень быстро получила устойчивые признаки. Так, быстро сформировались группы станочного оборудования для механической, кузнечно-прессовой обработки металла, литейного производства, гальванических покрытий различных поверхностей, для электро- и газосварочных работ, термической обработки металлов и их упрочнения и, наконец, для сборочных процессов и окраски. Станочное оборудование предназначалось в основном для обработки трех видов деталей, классификационные признаки которых являются базовыми до настоящего времени: тел вращения, различных корпусных деталей и так называемых плоских деталей, изготавливаемых из различного рода листовых материалов.

Рассмотрим на примере станкостроительного производства признаки, которыми обладали машиностроительные отрасли промышленности в период экстенсивного развития, продолжавшийся до 60—80-х годов XX века.

Технологические планировки машиностроительных заводов составлялись из различных комбинаций специализированных универсальных станков с ручным управлением, а это значит, что для управления и нормальной работы каждого станка необходимо было наличие рабочего — токаря, фрезеровщика, строгала и т. д., специальность которого отвечала технологическим принципам обработки деталей. Иными словами, весь технологический процесс машиностроительного производства в основном базировался на комбинации в различных технологических схемах отдельных ячеек, которые представляли собой систему человек—станок. Эта система отличалась высокой надежностью и живучестью; этими же свойствами обладали в период экстенсивного развития и целые машиностроительные производства и заводы.

В самом деле, если из всего комплекса станочного оборудования, которым должен быть оснащен завод, некоторое количество оказывалось непоставленным вовремя или неработоспособным, это по существу не имело решающего значения для функционирования или работоспособности завода: остальные станки (т. е. часть системы) достаточно устойчиво работали, снижалась только общая производительность. Таких показателей невозможно было добиться в процессах, которые осуществлялись машинами, предназначенными для реализации непрерывных технологических процессов, что, как правило, требует последовательного расположения машин и механизмов, вследствие чего они становятся взаимозависимыми от работоспособности каждого из компонентов, включенных в общую схему.

Второй важной особенностью дискретного станкостроительного производства является его большая гибкость, т. е. возможность на одном и том же станке изготавливать различные детали (разумеется, из совокупности однородных групп, связанных общими признаками, например: детали типа тел вращения, корпусные, плоские). Ограничениями служат типоразмерные характеристики.

Вместе с тем постоянная борьба за рост производительности станочного оборудования, непрерывное усовершенствование технических параметров станков выявляют ту же картину одновременного воздействия на процессы их развития прогрессивных и регрессивных факторов. Так, прогрессивным факторам живучести и гибкости производства постоянно противостояли регрессивные факторы низкой производительности, связанной с ручным управлением и низким быстродействием человека при выполнении управленческих функций. Постоянно растущие требования к квалификации, необходимость более продолжительной работы завода в течение суток (т. е. в две и три смены) входили в противоречие с тенденцией облегчения и интеллектуализации труда по мере повышения жизненного уровня и благосостояния народа. Например, стремление конструкторов агрегатировать различные операции на одном станке давало возможность резко поднять производительность труда, но одновременно снижало гибкость системы. Это было приемлемо для массового производства, но не могло удовлетворить единичное и мелкосерийное, где в то же время рост производительности труда был не менее актуален.

Отметим, что для отечественного станкостроения (как и для мирового) характерны усовершенствования не только отдельных видов оборудования и станков, которые использовались при промышленном производстве, но и различных схемных и технологических решений и, наконец, усовершенствование принципов функционирования и конструкций станочного оборудования с целью максимального снижения дискретности технологии изготовления различных деталей.

Все это наглядно прослеживается при анализе степени совершенства конструкций станочного оборудования, применяемого в машиностроительном комплексе.

В дореволюционной России станкостроение было развито слабо, и машиностроение базировалось в основном на импортных поставках. До 1915 г. некоторые акционерные общества — такие, как «Братья Бромлей» (Москва), «Феникс» (Петербург), «Фельзер» (Рига), а также другие предприятия центральной России и Урала, выпускали простейшие станки с невысоким техническим уровнем. Через некоторое время после национализации промышленности в 1918 г. при ВСНХ было организовано Главное управление металлической промышленности, которое объединило заводы с общей численностью работников немногим более 15 тыс. чел.; свыше 40 % имевшихся заводов было законсервировано из-за отсутствия сырья, материалов, энергии.

Официальной датой рождения отечественного станкостроения можно считать 1929 год, когда это направление было сформировано в качестве самостоятельной отрасли народного хозяйства. В мае 1929 г. был образован Станкотрест, а в 1930 г. на основе объединения станкостроительного и инструментального трестов было учреждено новое Всесоюзное Государственное объединение станкоинструментальной промышленности «Союзстанкоинструмент». Ему была поручена разработка вопросов единой технической политики, технического совершенствования оборудования и повышения производительности труда в отрасли.

Совершенствование станочного оборудования хорошо прослеживается хронологически при анализе создававшихся конструкций станков по мере развития отечественной станкоинструментальной промышленности. Одним из первых станков токарно-винторезной группы был станок ТН-15 завода «Красный пролетарий» (1923 г.). В 1930 г. на базе заграничных конструкций были созданы первые универсальные токарные станки, а с 1932 г. стали выпускать токарно-винторезный станок типа ДИП. Примерно через три года на тех же основах были созданы круглошлифовальные, зубодолбежные, зубофрезерные, долбежные, горизонтально-протяжные станки. Уже в 1935 г. на заводе им. Серго Орджоникидзе был выпущен первый отечественный многорезцовый токарный станок, что явилось завершением поисков конструкторов в направлении резкого повышения производительности труда на этом виде оборудования. В это же время появились первые револьверные станки, создание которых означало переход на качественно новый уровень узкой специализации, а также резкое повышение производительности труда на станках этого типа. При этом уровень подготовки рабочего требовался более низкий, чем при работе на обычном токарном станке с ручным управлением.

В 1934—1936 гг. появились первые агрегатные станки, в том числе многошпиндельные, а в 1935 г. — первые автоматические и полуавтоматические линии.

Великая Отечественная война задержала процесс технического развития станочного оборудования, предназначенного для широкого использования в народном хозяйстве. Только в 1946 г. появились первые автоматические линии из агрегатных станков для

обработки головок двигателя трактора на Харьковском тракторном заводе.

Процесс создания оборудования, автоматизированного по принципу жесткой технологии, т.е. предназначенного для изготовления массового вида деталей, начался практически с этого времени.

Однако поиски конструкторов продолжались в направлении сочетания высокой производительности при сохранении принципа переналаживаемости автоматизированных технологических линий.

В 1955 г. появились первые переналаживаемые автоматические линии. К этому времени вычислительная техника, автоматизация производства, средства контроля и управления получили достаточное развитие.

К 1958 г. появились предпосылки для создания первых станков с числовым программным управлением, а в 1965 г. был организован впервые в СССР автоматизированный участок, который состоял из станков с числовым программным управлением.

Начало 70-х годов ознаменовалось появлением многооперационных обрабатывающих центров, что качественно изменило подход к интенсификации процессов изготовления деталей, основанных на групповой технологии.

В 1972 г. были созданы первые автоматизированные участки со станками с числовым программным управлением и обрабатывающими центрами, которые управлялись от электронно-вычислительных машин и были оснащены автоматизированными складами. Эти участки были предназначены для обработки деталей типа тел вращения и корпусных.

В 1975 г. были созданы обрабатывающие центры со сменными многошпиндельными головками, а в 1978 г. — роботизированные участки с обслуживанием группы станков одним роботом. Наконец, начало 80-х годов ознаменовалось созданием автоматизированных участков с элементами системы автоматизированного проектирования конструкций деталей, обрабатываемых на этих участках.

Краткий хронологический экскурс в развитие отечественного станкостроения свидетельствует о постепенном переходе от экстенсивных принципов, которые базировались в основном на тиражировании технических решений, увеличении количества заводов и повышении их мощности (т.е. на концентрации в масштабах одного завода большого количества станочного оборудования), к более эффективным принципам построения системы организации производства станочного оборудования, основанном на использовании средств автоматизации управления.

В период экстенсивного развития отечественный машиностроительный комплекс и станкостроение имеют одни и те же признаки, поскольку именно станкостроение является базисной частью машиностроения. Это прежде всего ориентация станкостроительной промышленности на универсальное оборудование с ручным управлением, которое ею же выпускалось, а также использовалось другими машиностроительными отраслями.

Структура универсального оборудования включала в себя две части — механическую, связанную с конструкцией различных видов и типов станков, и вторую, состоящую из комплектующих изделий электропневмогидравлического типа. Проектировать такое оборудование можно было в пределах одного конструкторского бюро с использованием каталогов комплектующих изделий, которые выпускались в стране.

Такая же низкая степень координации специализированного труда по существу была достаточна при изготовлении универсальных станков с ручным управлением. Они выпускались на специализированных заводах, мощность которых позволяла, как правило, изготавливать такие конструкции с использованием кооперированных поставок комплектующих изделий и деталей специализированных производств. Несложные конструкции станочного оборудования обусловили форму специализированного обслуживания и ремонта при эксплуатации оборудования, которая заключалась в создании специальной службы на каждом предприятии.

Наконец, еще одной важной характеристикой этапа экстенсивного развития машиностроения является потребность в рабочих высокой квалификации, эксплуатирующих универсальные станки с ручным управлением (4—6-й разряд). Вспомогательный обслуживающий персонал при этом имел довольно низкую квалификацию (1—3-й разряд); этого было достаточно для успешного обслуживания станков.

Естественно, что длительное время машиностроение не могло базироваться на этих принципах развития. Конструкторы искали выход из создавшегося положения. Постепенно эти поиски привели к тому, что в станкостроении, как и в других отраслях машиностроения, были созданы новые конструкции, позволившие значительно повысить производительность труда путем замены управленческих функций человека специализированными системами управления, которые получили широкое распространение и развитие начиная уже с 1950 г.

Первым результатом перехода на новый уровень организации производства путем замены универсальных станков с ручным, т. е. гибким, управлением на жесткую систему управления явилось создание револьверных автоматов. Здесь впервые возникла необходимость в высокой квалификации вспомогательного персонала, занятого настройкой и наладкой автоматов, при соответствующем понижении квалификации рабочих, занятых на основных операциях. Затем были успешно реализованы полужесткие схемы управления автоматическими линиями, и наконец с применением ЭВМ стала внедряться гибкая система управления станочным оборудованием.

Таким образом, в 1950—1980 гг. в машиностроительных отраслях промышленности был накоплен достаточный опыт для перехода от принципов экстенсивного развития к принципам, в основе которых лежит всеобъемлющая интенсификация.

6.2. Переход на интенсивный путь развития

Вторжение научно-технического прогресса во все отрасли народного хозяйства обусловило резкий поворот процессов их развития на интенсивный путь. Это связано с развитием микропроцессорной техники, быстродействующих электроно-вычислительных машин и созданием на их базе систем управления, позволивших заменить функции управления, выполнявшиеся человеком, и таким образом значительно увеличить быстродействие процессов.

Кроме того, важное значение имеют те же принципы, которые в свое время привели к промышленной революции, т. е. возможность использовать системные решения в виде концентрации и сочетания высокоэффективного оборудования в одном производстве с автоматизацией организационно-управленческих функций, т. е. комплексный подход к решению поставленных задач.

Эффективность комплексных методов решения производственных проблем за счет оптимизации параметров технических, организационных и других задач возрастает примерно в 3 раза по сравнению с применением тех же средств автоматизации для отдельных видов машин. Если автоматизация рабочих мест позволяет повысить производительность труда в 2—2,5 раза, то комплексная автоматизация повышает ее на порядок. Это иллюстрируется следующим примером. Станок с числовым программным управлением сокращает требуемое количество оборудования по сравнению с универсальным (при эквивалентной производительности) в 3 раза, высвобождает в среднем 4 рабочих. Обработывающий центр соответственно сокращает потребность в оборудовании в 4 раза и высвобождает 7 рабочих; агрегатный станок с числовым программным управлением и автоматической сменой деталей и инструмента сокращает потребность оборудования в 5 раз и высвобождает 10 человек. Наконец, использование гибких автоматизированных производственных систем позволяет в 8 раз сократить требуемое оборудование и высвободить при этом от 40 до 70 рабочих.

Этот пример иллюстрирует возможности концентрации средств производства в виде использования интегрированных комплексов оборудования для решения задач повышения производительности труда.

Такая возможность была отмечена еще К. Марксом, когда он определил, что в комплексности таится дополнительная производительная сила. В данном случае под комплексностью мы понимаем концентрацию средств производства при одновременном использовании как средств комплексной механизации, так и средств комплексной автоматизации. Научная и инженерная мысль далеко продвинулась в этом направлении. Однако можно еще больше повысить эффективность интегрированных производственных систем, если нам удастся значительно повысить надежность таких систем и длительность их функционирования.

Рассмотрим пример. Проанализируем баланс рабочего вре-

мсни и непроизводительных потерь для двух разных по уровню интеграции видов оборудования: универсальных металлорежущих станков с ручным управлением и гибких автоматизированных производственных систем, предназначенных для тех же целей.

Из чего складывается 100 %-ный баланс времени этих видов оборудования?

Сначала о потерях времени. Прежде всего, имеют место организационные простои, связанные с несовершенством системы организации производства. Обслуживание рабочего места, профилактика, наладка оборудования также занимают определенное время. Требуется время на плановые ремонты. Кроме того, из-за ненадежности различных компонентов конструкций возникают внезапные отказы, на устранение которых также затрачивается время. Выходные и праздничные дни составляют примерно 30 % баланса времени. Наконец, имеются потери времени, связанные с требованиями улучшения условий труда: так, работу в третью смену можно допустить только в случае крайней необходимости, т. е. тогда, когда производственные процессы являются непрерывными и нужно обеспечить безостановочную работу оборудования (как правило, основные производства машиностроительных заводов не работают в третью смену). Наконец, обеденные перерывы, которые необходимы при работе человека даже в течение восьми часов, а также кратковременный перерыв на отдых занимают определенное время в общем балансе времени работы оборудования. Остальное время из суточного ресурса в 24 ч приходится на производственное функционирование станков с ручным управлением. Как мы видим, возможностей для роста эффективного времени работы, которое сегодня составляет немногим более 26 %, по существу не имеется.

Иные возможности открывает вовлечение в непрерывную работу гибких автоматизированных производственных систем. По мере устранения потерь времени на вынужденные простои оборудования, о которых шла речь выше, эффективность их использования значительно возрастает. Для автоматически и надежно работающих систем нет необходимости устраивать выходные и праздничные дни; они не имеют обеденных перерывов. Можно значительно снизить потери по организационным причинам, в связи с обслуживанием, профилактическими работами, сократить время плановых ремонтов. Наконец, самое важное — увеличить безотказность и долговечность таких систем.

Таким образом, можно довести уровень использования рабочего времени крупных интегрированных высокопроизводительных систем до 80 % и более. Это уровень, недостижимый при использовании универсального оборудования с ручным управлением.

Однако было бы неправильно думать, что высокая степень автоматизации и интеграции дается легко, достаточно решить лишь технические задачи. Объективные законы развития систем свидетельствуют о том, что усовершенствование средств производства вовлекает в процесс различные формы обеспечения этого разви-

тия, которые играют роль надстройки. Если средства производства, являясь базисной частью народнохозяйственного комплекса, развиваются непрерывно, то формы организации управления могут отставать в своем развитии, а иногда и противодействовать ему из-за несоответствия тому уровню развития, который достигнут основными средствами производства.

Рассмотрим влияние этих факторов на развитие интегрированных производственных систем по той же схеме, которая была принята нами для универсального оборудования с ручным управлением.

Во-первых, усложнилась структура оборудования. Она включает комплекс основного оборудования значительно более сложной конструкции, комплекс транспортно-складских систем, промышленные работы, целую систему инструмента и оснастки, устройства для удаления отходов производства, системы автоматизированного управления, системы контроля и диагностирования, системы конструкторского и технологического обеспечения автоматизированного типа, которые не требовались для универсального оборудования. При этом остается структурная часть, которая была и у универсального оборудования; ее составляют комплектующие изделия электропневмогидравлического типа.

Спроектировать такую интегрированную производственную систему уже невозможно автономно, в рамках одного конструкторского бюро, без привлечения специализированных предприятий и организаций, которые занимаются разработкой различных специальных систем. Необходимо использование тех областей знаний и деятельности человека, которые связаны с глубоким разделением труда. В современных условиях задача проектирования таких комплексных систем разрешается лишь при широкомасштабной координации работ с привлечением специализированных организаций.

Изготовить такую интегрированную систему также не представляется возможным в рамках одного завода или даже заводов одного министерства. Требуются уже планирование и комплектные поставки функционально законченных составных частей интегрированных систем на уровне союзных ведомств. При этом использование кооперации и комплектующих изделий остается в силе, как и при изготовлении универсального оборудования.

Изменяется положение дел и с ремонтом. Обслуживание с обеспечением гарантированной работоспособности систем уже невозможно осуществить силами предприятия, эксплуатирующего интегрированный комплекс; это становится экономически невыгодным. Сделать это можно только силами предприятий — поставщиков структурных составных частей гибких производственных систем и специализированных предприятий.

Таким образом, в период интенсивного развития экономики машиностроительного комплекса страны необходим переход на иные принципы распределения и обслуживания оборудования, которые связаны с широкомасштабным развитием машинносервис-

ных работ. Это не требовалось в период развития экономики страны на экстенсивных началах.

Еще один интересный аспект заключается в том, что при максимальной степени совершенствования интегрированных производственных систем, т. е. при обеспечении высоких уровней надежности, автоматизации, комплексности и т. д. отпадает необходимость в привлечении основных рабочих высокой квалификации. По существу требуется сочетание специалистов разного уровня квалификации в бригадной форме организации труда, которые работают на один конечный результат, заключающийся в наиболее эффективном функционировании интегрированной производственной системы. Появляются новые объективные условия развития коллективных форм организации труда.

В итоге важным фактором успешного развития машиностроения и других отраслей народного хозяйства при ориентации на внедрение высокой интеграции автоматизированных средств производства является проведение единой научно-технической политики в стране. С этой целью Центральным Комитетом КПСС и Советом Министров СССР было принято специальное Постановление «О мерах по ускорению научно-технического прогресса в народном хозяйстве» (1983 г.). Это постановление знаменует собой прежде всего переход на интенсификацию всех процессов в отечественном машиностроении. Меры, изложенные в нем, являются основополагающими в развитии всей экономики страны, когда широкомасштабная автоматизация технологических процессов на основе применения гибких производственных систем, автоматизированного высокопроизводительного станочного оборудования, робототехнических комплексов и вычислительной техники в народном хозяйстве становится главным направлением повышения производительности труда. Все это обуславливает своевременность реализации программно-целевого планирования, которое является в настоящее время основным во всех отраслях народного хозяйства страны.

Крупномасштабные задачи развития отечественного машиностроения, как и других отраслей промышленности и народного хозяйства, требуют также соответствующего обеспечения организационными мерами. Базирование на применение интегрированных систем в машиностроении представляет собой переход на качественно новый уровень организации производства, который позволяет значительно повысить производительность труда, сократить потребность в основном оборудовании и значительно уменьшить численность рабочих. Такие показатели невозможно получить простым сложением разрозненного универсального и даже автоматизированного оборудования, которое еще 10—15 лет назад было материальной основой машиностроительных отраслей. Эффект в данном случае получается за счет минимизации непроизводительных потерь в дискретных технологических процессах, что достигается применением современного гибкоперестраиваемого высокопроизводительного оборудования и систем автоматиче-

ского управления на основе микропроцессорной техники и высокопроизводительных ЭВМ.

Если экстенсивный период развития отечественного машиностроения и, в частности, станкостроения можно назвать первой стадией развития — стадией механизации, то в настоящее время осуществляется переход этих отраслей народного хозяйства в другую стадию — комплексной автоматизации, которая позволяет достигнуть небывалых результатов с точки зрения роста производительности труда, качества выпускаемой продукции и идентичности ее технических показателей. Таким образом, использование достижений науки и техники в настоящее время обеспечивает высокую динамику роста производительности в различных отраслях народного хозяйства. Этот активный процесс будет развиваться и впредь, поскольку возможности роста производительности труда при современных средствах автоматизации далеко не исчерпаны; процесс находится в активной фазе S-функции. Вместе с тем, как отмечалось в докладе Генерального секретаря ЦК КПСС М. С. Горбачева «Коренной вопрос экономической политики партии», достигнутый уровень технического развития породил ряд проблем, которые требуют разрешения не только научно-технических и производственных задач, но и задач организации управления отраслями народного хозяйства.

6.3. Обеспечение единой научно-технической политики

При проведении научно-исследовательских работ и проектировании головной разработчик современных интегрированных производственных систем вынужден, как уже говорилось, широко привлекать специализированные предприятия и организации, которые занимаются созданием специальных структурных составных частей, в том числе систем управления и программно-математического обеспечения, используемых для разработки, изготовления и функционирования конкретной интегрированной системы. В конечном счете разработчик такой системы несет ответственность за результаты труда многочисленных субподрядных организаций, воплощенного в создаваемых интегрированных системах. Именно этим обусловлена необходимость проведения единой технической политики, осуществляемой Генеральным или Главным конструктором подобных систем, и координации им всех видов работ по вопросам научных исследований, разработки конструкций, стандартизации, определения технического уровня и параметров различных систем и компонентов, а также по производственным вопросам, вплоть до подготовки и аттестации кадров руководителей и ведущих специалистов проектно-технологических служб независимо от их ведомственной принадлежности.

Формировать общую научно-техническую политику при создании технических систем, таких как, например, гибкие автоматизи-

рованные производственные системы независимо от области их применения, должна базовая отрасль, создающая основное оборудование, в данном случае — Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности, из состава специалистов которого назначается Генеральный конструктор. Эти вопросы предусмотрены постановлением Центрального Комитета КПСС и Совета Министров СССР «Об ускорении научно-технического прогресса в народном хозяйстве».

Общетехнические требования, государственные стандарты, задания на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в стране должны разрабатываться под руководством базовой отрасли, создающей основное оборудование технологических линий. Генеральный конструктор интегрированных систем в своей работе опирается на Главных конструкторов, которые специализируются в области научных исследований, разработки конструкций и создания специализированных структурных составных частей интегрированных систем.

Если говорить о создании в машиностроительных отраслях гибких автоматизированных производственных систем, номенклатура которых включает 10 типов технологических переделов (механо-обработка, кузнечно-прессовая обработка, литейное производство и т. д.), то по этим видам специализации должны назначаться Главные конструкторы составных структурных частей гибких производственных систем. Главные конструкторы возглавляют научно-исследовательские институты по технологическим переделам и осуществляют головную роль в своей специализации. В их функции войдет также согласование и представление на утверждение Генеральному конструктору технических проектов гибких автоматизированных производственных систем и их составных частей, разрабатываемых под руководством главных инженеров проектов в различных отраслях машиностроения.

Для обеспечения эффективной аттестации специалистов, под руководством которых создаются проекты гибких автоматизированных производственных систем, представляется целесообразным, чтобы кандидатуры главных инженеров проектов этих систем также согласовались с Главными конструкторами и утверждались Генеральным конструктором, поскольку Главные конструкторы несут ответственность за экспертизу технико-экономических обоснований необходимости создания гибких автоматизированных производственных систем на каждом конкретном предприятии-заказчике, за техническую готовность заказчика эффективно использовать такое оборудование.

В итоге во всех машиностроительных отраслях должны быть созданы специализированные службы, назначены ответственные специалисты, которые будут развивать и конкретизировать все вопросы единой технической политики при создании современных средств производства, вплоть до установления порядка проведения межведомственных испытаний оборудования и системы его обслуживания и ремонта.

Коллегиальное обсуждение и координация всех работ, проводимых министерствами и ведомствами в области создания интегрированных производственных систем, а также важнейших видов комплектующих изделий, осуществляется на советах Генеральных или Главных конструкторов. Советы могут создаваться в базовой отрасли, отвечающей за единую техническую политику по этим видам оборудования.

Таким образом, масштабность работ, связанных с научными исследованиями, разработкой конструкций оборудования, проектированием предприятий, внедрением современных технологических процессов с помощью интегрированных производственных систем, требует координированной и согласованной деятельности разноплановых специализированных предприятий и организаций, а также планирования изготовления современной машиностроительной продукции на уровне Государственного планового комитета СССР, поскольку для ее широкомасштабного тиражирования необходимы большие материальные, трудовые ресурсы и соответствующие капитальные затраты.

6.4. Требования к техническому уровню и качеству

Поскольку принцип функционирования современных интегрированных систем в машиностроении обусловлен последовательной схемой обработки деталей, выход из строя любого звена такой системы приводит к остановке или аварийным ситуациям всей технологической линии. Поэтому выход из строя даже небольшой микросхемы в системе управления гибкой автоматизированной производственной системой может привести к аварийной ситуации, как и выход из строя такой крупной детали, как станина обрабатывающего центра, если она некачественно изготовлена и не выдерживает механических нагрузок, которые возникают при работе такой системы.

В данном случае положение меняется коренным образом по сравнению с экстенсивным этапом развития машиностроения, когда выход из строя отдельных станков в цехе, на заводе не приводил к остановке всей системы. Это значит, что требования, предъявляемые к уровню надежности функционирования всех составных частей гибкой автоматизированной производственной системы, по существу равнозначны независимо от стоимости, трудоемкости и других затрат, которые потребовались на их создание.

В то же время многочисленность поставщиков составных частей гибких автоматизированных производственных систем и их географическая разбросанность, как правило, резко снижают возможности оперативного устранения недостатков, обнаруженных при монтаже и наладке, а также во время эксплуатации технологической линии. Положение осложняется еще и тем, что предприятия — поставщики оборудования до 1985 г. отвечали за качество

продукции лишь в пределах объемов собственных поставок и были мало заинтересованы в строгом обеспечении проектных показателей всей технологической линии. В каждом конкретном случае необходимо определить объективные условия разработки, постановки на производство и промышленной эксплуатации современных интегрированных систем, достигших высокого технического уровня. Нужно развивать и далее меры, обуславливающие моральную и материальную заинтересованность руководителей и коллективов предприятий — поставщиков структурных составных частей и комплектующего оборудования в достижении комплектной технологической линии в запланированные сроки проектных показателей и гарантированной работоспособности при эксплуатации, т. е. в конечном результате, а также их ответственность за это.

Отсюда вытекает необходимость разработки соответствующих мер, обеспечивающих поставку предприятиями — поставщиками всех составных частей интегрированных систем с гарантированной работоспособностью, которая подкрепляется научно-техническими мероприятиями, повышающими качество поставляемых изделий, а также обеспечением необходимым количеством запасных частей и соответствующим объемом принадлежностей.

Нормативные сроки гарантированной работоспособности должны быть увязаны со сроком окупаемости каждой конкретной интегрированной системы. Заинтересованность предприятий-поставщиков в обеспечении гарантированной работоспособности комплектной технологической линии должна подкрепляться соответствующей ценой или надбавкой к цене на каждую комплектную технологическую линию и ее основные части.

Поскольку в условиях обеспечения гарантированной работоспособности поставляемых изделий резко возрастает роль и объем работ предприятий-поставщиков по внешнему обеспечению, т. е. объективно обусловлен рост машинносервисных работ, необходимо ввести этот показатель в качестве основного наравне с показателями по объему товарной продукции или объему реализации в производственный план, отдельной строкой, также планируемой централизованно. Следует ввести и соответствующую статистическую отчетность по этим вопросам.

Таким образом, декретирования требуют вопросы морального и материального стимулирования, а также меры ответственности в случае невыполнения заданного уровня гарантированной работоспособности поставляемых изделий в рамках интегрированных комплексов, на которых базируется развитие отраслей народного хозяйства, в первую очередь машиностроительных.

6.5. Комплектные поставки интегрированных систем

В нашей стране обеспечение вновь создаваемых объектов народного хозяйства оборудованием осуществляет Государственный комитет по материально-техническому снабжению СССР. Уста-

повлеченная им система хорошо себя зарекомендовала в период экстенсивного развития машиностроения, в составе которого производственные мощности в основном имели разрозненное универсальное оборудование с ручным управлением. Как уже говорилось, вновь создаваемые по такому принципу мощности обычно способны были функционировать даже в случае, если некоторое количество оборудования не было поставлено своевременно или оказывалось временно неработоспособным.

Когда мы имеем дело с современными гибкими автоматизированными производственными системами, которые могут функционировать лишь при условии своевременной поставки всего комплекса оборудования (основного, вспомогательного, систем управления и т.д.), существующий порядок комплектования уже не удовлетворяет жестким требованиям пуска интегрированных комплексов и дальнейшей их эксплуатации. Создание большой номенклатуры структурных составных частей гибких производственных систем требует вовлечения обширных материальных ресурсов, централизованного их планирования и распределения, при котором недопустимы сбои ввиду серьезных отрицательных последствий. В этой связи требуется установить порядок организации всех видов работ: у заказчика, головного поставщика и субпоставщиков оборудования, чтобы на этой основе сформировать систему заказа, разработки, изготовления, комплектной поставки, монтажа, авторского надзора, квалифицированной эксплуатации и машинного сервиса с целью обеспечения гарантированной работоспособности технических систем на проектных параметрах.

Весь ход дальнейшего развития отечественного машиностроения во многом зависит от того, насколько будут учтены все особенности развития современной техники и подкреплены необходимыми формами управления. При этом нужно максимально использовать преимущества централизованного планирования, умело сочетая его действенность с заинтересованностью и ответственностью коллективов предприятий и организаций, активно участвующих в процессе развития машиностроительных отраслей промышленности.

В соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О широком распространении новых методов хозяйствования и усилении их воздействия на ускорение научно-технического прогресса» все эти положения в настоящее время разработаны и должны быть реализованы. Отметим, что предполагаемые изменения не требуют коренной ломки существующей системы планирования и распределения, а предусматривают лишь приведение отдельных ее звеньев в соответствие с достигнутым уровнем развития средств производства.

Прослеженные на примере станкостроения этапы развития машиностроительных отраслей промышленности свидетельствуют о том, что объективные закономерности развития орудий труда обусловили соответствующие условия функционирования крупных народнохозяйственных комплексов. Знание этих закономерностей

важно еще и потому, что иначе невозможно составлять реальные

В соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров планы производства, рационально использовать ресурсы с учетом тенденции дальнейшего совершенствования основных средств производства, на которых базируется народное хозяйство.

Что касается машиностроительных отраслей промышленности, в частности, станкостроения, то процесс развития их средств производства находится в активной фазе S-функции и возможности интенсивного роста технико-экономических показателей могут быть реализованы рационально и своевременно.

В этой связи недавно принятое ЦК КПСС и Советом Министров СССР Постановление о мерах по коренному повышению технического уровня, качества машиностроительной продукции и развитию машиностроения как основы научно-технического прогресса на 1986—1990 годы и на перспективу до 2000 года является своевременной и конкретной мерой научно обоснованного подхода к решению важных народнохозяйственных задач нашего государства. Есть все основания для успешного выполнения положений, предусмотренных этим Постановлением.

Вывявленные и проанализированные в настоящей монографии закономерности развития технических систем позволяют на научной основе прогнозировать изменение технических параметров этих систем. Высокая сходимость расчетных показателей S-функции с фактическими результатами свидетельствует о том, что аналитическая модель пригодна для практического использования. Разработанный метод прогнозирования существенно поднимает роль и значимость ретроспективных статистических данных технических систем, которые до настоящего времени специалистами не оценивались должным образом. Вместе с тем их ценность заключается в том, что именно статистические данные развития технических систем в прошлом несут в себе «наследственные признаки», которые неизбежно проявятся в будущем. Таким образом, особенно актуальной становится задача формирования банков статистических данных по каждому виду технических систем, построения S-функций их развития и непрерывного прослеживания их сходности с новым пополнением статистических данных. С помощью современных электронно-вычислительных машин эта задача становится легко разрешимой.

Вместе с тем следует отметить, что в настоящей работе исследованы и описаны закономерности, аналитическая модель которых охватывает период развития лишь в пределах одной стадии, хотя она инвариантна и принадлежит семейству S-функций (см. рис. 42), обладающих определенными свойствами. Очевидно, что весь поэтапный процесс также имеет определенную закономерность развития, которая должна аппроксимироваться в виде кривой, огибающей семейство S-функций. Есть все основания полагать, что она также должна иметь S-образную форму. Во всяком случае, характер ретроспективного периода развития научно-технического прогресса с началом перехода его в настоящее время в научно-техническую революцию (активная часть S-функции) свидетельствует об этом. Вместе с тем такое предположение должно быть доказано, только тогда оно будет иметь научную ценность.

В работе не рассмотрены также общие теоретические основы прогнозирования процессов развития технических систем $y=S(t)$ при $0 \leq t \leq \infty$. Все это представляет самостоятельные области исследований. Нет сомнений, что эти исследования будут не только

осуществлены, но и использованы должным образом в народнохозяйственной деятельности.

Выявленные закономерности развития технических систем, которым посвящена настоящая монография, вселяют уверенность в реальности выполнения этих задач. Будущее же должно подтвердить жизнеспособность и практическую ценность закономерностей развития технических систем, которым посвящена эта книга.

1. Маркс К. Капитал. Т. 1. М.: Госполитиздат, 1983. 907 с.
2. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. Изд. 2-е. М.: Госполитиздат, 1960, т. 23, с. 191.
3. Ленин В. И. Полное собрание сочинений. М.: Госполитиздат, 1978. Т. 1. (с. 409); т. 2 (с. 61—69, 77—80, 364—365); т. 3 (с. 375, 404, 415, 419, 433, 434, 548, 568, 572, 576, 577); т. 4 (с. 278, 416); т. 7 (с. 172, 173); т. 22 (с. 345, 346); т. 23 (с. 126—128); т. 37 (с. 205); т. 38 (с. 330); т. 41 (с. 78); т. 45 (с. 363).
4. Абрамов С. Б. Механизация ручного труда: Робототехника. М.: Знание, 1983. 64 с.
5. Абрамов И. Н. Прогноз и предприятие. М.: Знание, 1976. 61 с.
6. Барштейн И. К., Щербаков В. А. Общая характеристика развития отечественного котлостроения.—В кн.: Энергетическое машиностроение 1917—1964. Л.: Энергия, 1967. 229 с.
7. Барышников В. Д., Куликов С. Н. Автоматизированные электроприводы машин бумагоделательного производства. Л.: Энергия, 1982. 140 с.
8. Бестужев-Лада И. В. Окно в будущее. Современные проблемы социального прогнозирования. М.: Мысль, 1970. 269 с.
9. Болховитинов В. Ф. Пути развития летательных аппаратов. М.: Оборонгиз, 1962. 131 с.
10. Большие системы. Теория, методология, моделирование. М.: Наука, 1971. 328 с.
11. Бумагоделательная машина 2001 года.—Реф. сб. Бумага и целлюлоза, 1973, № 8, с. 8.
12. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Энергетическая техника и ее развитие. М.: Высшая школа, 1976. 303 с.
13. Викторов М. Т., Смирнов К. А. Основные направления развития производства широких бумагоделательных машин для изготовления газетных бумаг. М.: Знание, 1972. 46 с.
14. Гвишиани Д. М., Лисичкин Б. А. Прогностика. М.: Знание, 1968. 92 с.
15. Гмошинский В. Г., Флиорент Г. И. Теоретические основы инженерного прогнозирования. М.: Наука, 1973. 303 с.
16. Гринберг М. И. Конструкции паровых турбин.—В кн.: Развитие техники на Ленинградском металлическом заводе. Л.: Машгиз, 1957. 313 с.
17. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1977. 647 с.
18. Добров Г. М. Наука о науке. Киев: Наукова думка, 1970. 320 с.
19. Добров Г. М. Прогнозирование науки и техники. М.: Наука, 1977. 208 с.
20. Дрё Ф. Экология. М.: Атомиздат, 1976. 167 с.
21. Ежикевич Г., Крупский З. Новое в конструировании бумагоделательных машин в Финляндии.—Бумажная промышленность, 1955, № 11, с. 30—31.
22. Журдо С. Г. О параметрах бумагоделательных машин для новых предприятий.—Бумажная промышленность, 1967, № 6, с. 24—26.
23. Захаров А. А. Сталь для паровых котлов.—В кн.: Энергетическое машиностроение 1917—1967. Л.: Энергия, 1967. 229 с.
24. Земзин В. Н. Сварка материалов энергооборудования.—В кн.: Энергетическое машиностроение 1917—1967. Л.: Энергия, 1967. 229 с.
25. Иванов С. Н. Технология бумаги. М.: Лесная промышленность, 1970. 695 с.
26. История философии. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 718 с.

27. Калашников В. В. Сложные системы и методы их анализа. М.: Знание, 1980. 61 с.
28. Каменев А. Ф., Бойков Г. Г. Производство бумаги на машинах с формованием бумажного полотна между двумя сетками.— Бумажная промышленность, 1975, № 8, с. 16—17.
29. Каменев А. Ф. Надежность бумагоделательных машин. М.: Лесная промышленность, 1978. 144 с.
30. Капица П. Л. Эксперимент, теория, практика. М.: Наука, 1981. 494 с.
31. Кедров Б. М. Классификация наук. Т. 1. М.: Изд. ВПИ и АОИ при ЦК КПСС, 1961. 471 с.; Т. 2. М.: Мысль, 1965. 543 с.
32. Ковалев Н. Н. Развитие производства гидротурбин.— В кн.: Энергетическое машиностроение 1917—1967. Л.: Энергия, 1967. 229 с.
33. Коммунист, 1982, № 12, с. 13—24.
34. Конструктивные особенности быстроходных бумагоделательных машин.— Бумажная промышленность, 1954, № 9, с. 26—30; № 11, с. 30—32; № 12, с. 24—26.
35. Кугушев И. Д. Основы теории расчета бумагоделательных машин. Конспект лекций. Ч. I и II. Л.: Изд-во ЛТА, 1968. 293 с.
36. Кугушев И. Д. Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы. М.: Лесная промышленность, 1967. 262 с.
37. Крейсон П. М. Самолеты за 20 лет. М.; Л.: Госмашметиздат, 1934. 211 с.
38. Леонович А. А. Основы научных исследований в химической переработке древесины. Л.: Изд-во ЛТА, 1982. 54 с.
39. Либерман Л. Я., Левин Б. И. Стали и сплавы для паровых и газовых турбин.— В кн.: Энергетическое машиностроение 1917—1967. Л.: Энергия, 1967. 229 с.
40. Лисичкин В. А. Теория и практика прогностики. М.: Наука, 1972. 223 с.
41. Марков Н. М. Основные этапы развития паротурбостроения.— В кн.: Энергетическое машиностроение 1917—1967. Л.: Энергия, 1967. 229 с.
42. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 590 с.
43. Микulinский С. Р., Черняк В. С. В поисках теории развития науки. М.: Наука, 1982. 293 с.
44. Научно-техническое прогнозирование для промышленности и правительственных учреждений. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1972. 269 с.
45. Никольский Н. Г. Некоторые особенности производства газетной бумаги в Канаде.— Бумажная промышленность, 1967, № 6, с. 26—27.
46. Овчинников Ю. А. Марксизм и научно-технический прогресс.— Вестник АН СССР, 1983, № 5, с. 25—39.
47. Проектирование самолетов/А. А. Бадягин, С. М. Егер, В. Ф. Машин и др. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1972. 187 с.
48. Развитие параметров бумагоделательных машин/А. Ф. Каменев и др. М.: Лесная промышленность. 1981. 192 с.
49. Родионов В. М. Особенности развития технических наук в период ИТР.— В кн.: Вопросы истории естествознания и техники. М., 1979, вып. 64—66, с. 30—32.
50. Саркисян С. А., Ахундов В. М., Минаев Э. С. Анализ и прогноз развития больших технических систем. М.: Наука, 1983. 279 с.
51. Саркисян С. А., Ахундов В. М., Минаев Э. С. Большие технические системы. М.: Наука, 1977. 349 с.
52. Соломко В. С. Новое в проектировании, производстве и модернизации бумагоделательных машин.— Бумажная промышленность, 1957, № 2, с. 25—28.
53. Справочник по электропотреблению в промышленности. М.: Энергия, 1978. 496 с.
54. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесная промышленность, 1980. 248 с.
55. Терентьев О. А. Основы теории движения волокнистых суспензий в машинах и аппаратах целлюлозно-бумажной промышленности. Автореф. дис. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. Л., 1975. 42 с.
56. Учаскина З. В. Развитие бумажного производства в России. М.: Лесная промышленность, 1972. 256 с.

57. Участина З. В., Каспаров Г. Б. Экономика, организация и планирование ЦБП. М.: Лесная промышленность, 1972. 374 с.
58. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. М.: Наука, 1970. 607 с.
59. Фотиев С. А. Технология бумаги. М.; Л.: 1933, с. 14—40.
60. Шухман Ф. Г. Бумагоделательные машины. М.; Л.: 1954, с. 3—22.
61. Шухман Ф. Г. Вопросы проектирования быстроходных бумагоделательных машин.— Бумажная промышленность, 1953, № 12, с. 10—16.
62. Философская энциклопедия: Т. 4. М.: Советская энциклопедия, 1967. 591 с.
63. Яновец Ю. В. Закономерности научно-технического прогресса и их планомерное использование. М.: Экономика, 1984. 239 с.
64. Эйлин И. Я. Бумагоделательные и отделочные машины. М., 1970. 142 с.
65. Ямпольский С. М., Лисичкин В. А. Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Экономика, 1974. 207 с.
66. Brecht W. Rückschau auf eine Amerikaniese.— Wochenblatt für Papierfabrikation, 1960, Bd. 88, N 23, S. 1057—1070.
67. Brecht Walter. Herstellung des Papiers in den vergangenen 100 Jahren — Forschung, technische Entwicklung und Ausbildung.— Wochenblatt für Papierfabrikation, 1970, N 7, S. 273—296.
68. Gas Turbine World Performance Specs. London, 1982, vol. 4, p. 25—33.
69. Donge W. G. Newsprint Development: Past, Present and Future.— Pulp and Paper Magazine of Canada, 1964, vol. 65, p. 71—75.
70. Kamyr continuous cooking plants. Kamyr, 1972.
71. Manufacture and Testing of Paper and Bord. New York, London, Toronto, 1953, vol. 3, p. 944.
72. Moore Harry C. Where healthy paper industry is heading.— Pulp and Paper, 1967, vol. 41, N 39, p. 30—31.
73. Moore Harry C. 1946—1967 — What next.— Southern Pulp and Paper manufacture, 1967, vol. 30, N 11, p. 79—83.
74. Obenchain D. Noei. Paper machine instrumentation A. D. 2001.— Tappi, 1971, vol. 54, N 5, p. 687—697.
75. Pollitzer Stephanie. What the boys in the back room for future machines present formers.— Pulp and Paper, 1970, vol. 44, N 4, p. 94—95.
76. Stark H. Entwicklungstendenzen im Bau von Papier- und Kartonmaschinen.— Wochenblatt für Papierfabrikation, 1978, N 6, S. 54—59.
77. Schmidt Karl. Entwicklungstendenzen im Papiermaschinenbau.— Papier (BRD), 1971, Bd. 25, N 10A, S. 731—755.
78. Zarson H. O. Modernization of Paper machines for improved quality and production.— Appita, 1973, vol. 26, N 26, p. 449—453.
79. World's paper machines — capacity, width and speed.— Paper, 1973, vol. 180, N 4, p. 198—199.

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1	
Ретроспективный анализ развития орудий труда	11
1.1. Изменение функций орудий труда в процессе развития	—
1.2. Появление технических систем	21
1.3. Иерархическая структура орудий труда в народном хозяйстве	25
1.4. Основные принципы развития технических систем	30
1.5. Условия развития технических систем в период научно-технического прогресса	37
Глава 2	
Теоретические основы закономерностей развития технических систем . .	41
2.1. Характеристики технических систем	—
2.2. Методика анализа процессов развития технических систем	44
2.3. Анализ развития бумагоделательных машин как технических систем	46
Особенности бумагоделательных машин как технических систем . .	—
Функциональные особенности бумагоделательных машин	49
Развитие параметров и конструкций бумагоделательных машин . .	54
Общие тенденции развития бумагоделательных машин и технических систем в целом	88
Глава 3	
Аналитическая модель развития технических систем	92
3.1. Оценка методов прогнозирования	—
3.2. Математическая интерпретация процесса развития	96
3.3. S-функция развития	101
3.4. Метод расчета S-функций развития	106
Упрощенное вычисление S-функций первого типа	109
Вычислительная процедура для S-функций	112
Метод приближенного вычисления S-функций второго типа	115
Вычисление параметров S-функций третьего типа	119
Анализ результатов расчета S-функций развития скорости бумаго- делательных машин	125
3.5. Вычислительная процедура для нахождения активного участка S- функции	128
3.6. Закономерности развития, обусловленные свойствами S-функций	133
3.7. Нахождение параметров S-функций по ограничениям на начальные данные	138
Глава 4	
Закономерности развития других видов технических систем	142
4.1. Целлюлозное оборудование	—
4.2. Транспортные машины	148
4.3. Энергетическое оборудование и машины-двигатели	152
Паровые котлы	154
Турбины	156
4.4. Другие виды технических систем	161
4.5. Научно-технический прогресс и значение закономерностей развития технических систем	170

Глава 5.	
Методические основы прогнозирования развития технических систем . .	178
5.1. Общие принципы	—
5.2. Выбор главного параметра	182
5.3. Причинно-следственный анализ развития параметров	184
5.4. Математическая интерпретация статистических данных развития . . .	188
5.5. Оформление результатов прогноза и выводы	189
Глава 6	
Развитие машиностроительного комплекса промышленности	193
6.1. Период экстенсивного развития	—
6.2. Переход на интенсивный путь развития	200
6.3. Обеспечение единой научно-технической политики	204
6.4. Требования к техническому уровню и качеству	206
6.5. Комплексные поставки интегрированных систем	207
Заключение	210
Список литературы	212

Александр Федорович Камнев

ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ

Редактор *И. А. Фрешко* Художественный редактор *С. С. Венедиктов*
 Технический редактор *П. В. Шиканова* Корректор *А. И. Лавриненко*
 Переплет художника *Б. Н. Осенчакова*

ИБ № 4837

Сдано в набор 10.06.85. Подписано в печать 1.11.85. М-22174. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 13,5. Усл. кр.-отт. 13,5. Уч.-изд. л. 14,39. Тираж 2000 экз. Заказ 179. Цена 2 р. 50 к.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машиностроение», 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.

А.Ф. Каменев

ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ:

закономерности
развития