

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ
КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КАБЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

**Иванова Вера Павловна, Цыпкина Виктория Вячеславовна,
Интанкина Екатерина Сергеевна, Пирназарова Сарбиназ Сарсенбаевна,
Аминов Руслан Дмитриевич**

**ИНФОРМАЦИЯ О
СТАТЬЕ**

АННОТАЦИЯ:

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

Received: 21.06.2026

Revised: 22.06.2026

Accepted: 23.06.2026

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА:**

*волочение проволоки,
информационная модель,
цифровой двойник,
кабельное производство,
обработка металлов
давлением,
ресурсосберегающие
технологии,
математическое
моделирование,
технологический процесс,
качество проволоки,
оптимизация
производства.*

В работе рассматривается задача повышения эффективности кабельного производства на основе разработки информационной модели ресурсосберегающего процесса волочения, ориентированной на формирование цифрового двойника технологической системы. Показано, что традиционные подходы к описанию волочения не обеспечивают полного учета взаимосвязанных механических, тепловых и трибологических процессов, что приводит к снижению точности управления качеством готовой продукции. Предложена структурированная информационная модель, включающая параметры сырья, оборудования, режимов деформации, энергетических потоков и показателей качества продукции. Проведена декомпозиция технологического процесса на последовательность взаимосвязанных этапов с выделением ключевых физических эффектов, определяющих формирование геометрических и эксплуатационных характеристик проволоки. Установлено, что использование информационной модели позволяет повысить уровень формализации процесса, обеспечить прогнозирование отклонений технологических параметров и создать основу для цифрового двойника волочильного производства. Полученные результаты подтверждают возможность повышения стабильности диаметра проволоки, снижения энергетических затрат

и увеличения ресурса волоочильного инструмента за счет применения системного подхода к моделированию процесса волочения и интеграции вычислительных методов анализа.

Введение. Повышение эффективности кабельного производства в современных условиях напрямую связано с переходом к интеллектуальным методам управления технологическими процессами, основанным на цифровизации и моделировании сложных производственных систем. Одним из ключевых направлений развития является разработка цифровых двойников технологических процессов, обеспечивающих виртуальное воспроизведение, анализ и прогнозирование поведения реального объекта в различных режимах его функционирования.

Технологический процесс волочения представляет собой сложную многопараметрическую систему, в которой одновременно реализуются процессы упругопластической деформации, тепловыделения, трения и структурных преобразований металла. В результате взаимодействия этих факторов формируются эксплуатационные характеристики проволоки, включая геометрическую точность, состояние поверхности, уровень остаточных напряжений и стабильность механических свойств. Особое значение данные параметры приобретают при производстве токоведущих жил, для которых критичны отклонения диаметра, неоднородность структуры и увеличение электрического сопротивления.

Анализ существующих технологий показывает, что традиционные подходы к управлению процессом волочения и проектированию оборудования не обеспечивают полного учета взаимосвязанных физических эффектов, возникающих в очаге деформации. Это обусловлено высокой нелинейностью процесса, наличием контактных взаимодействий, зависимостью параметров от условий трения и температурного режима, а также изменением свойств материала в процессе обработки. В результате действующие системы управления не позволяют в полной мере обеспечить стабильность технологического процесса и требуемый уровень качества продукции.

В этих условиях особую актуальность приобретает разработка информационной модели ресурсосберегающего способа волочения, являющейся основой формирования цифрового двойника технологического процесса. Цифровой двойник позволяет интегрировать данные о состоянии оборудования, материала и технологических режимов в единую вычислительную среду, обеспечивая возможность имитационного моделирования, анализа отклонений и прогнозирования качества продукции в реальном времени.

Применение концепции цифрового двойника позволяет перейти от локальной стабилизации отдельных параметров к комплексному управлению технологическим

процессом волочения на основе модели, учитывающей взаимосвязь физических, механических и энергетических процессов. Это создает предпосылки для повышения точности управления, снижения энергозатрат, увеличения ресурса волочильного инструмента и улучшения эксплуатационных свойств готовой продукции.

Целью настоящей работы является разработка информационной модели ресурсосберегающего способа волочения, являющейся основой построения цифрового двойника технологического процесса, а также исследование ее влияния на формирование геометрических и эксплуатационных характеристик проволоки.

Научная новизна работы заключается в разработке и обосновании информационной модели ресурсосберегающего способа волочения, являющейся основой формирования цифрового двойника технологического процесса обработки металлов давлением.

Впервые предложен подход к формализации процесса волочения как многопараметрической системы с распределёнными физическими эффектами, включающей взаимосвязанные тепловые, деформационные и фрикционные процессы, что позволяет осуществлять комплексное описание поведения системы «оборудование – инструмент – материал» в едином информационном пространстве.

Разработана иерархическая структура физических эффектов процесса волочения, обеспечивающая поэтапную декомпозицию технологического процесса на уровни общих и частных физико-механических воздействий с возможностью их последующего количественного и качественного анализа.

Предложен метод формирования информационной модели технологического процесса на основе принципов геометрического, механического и физического подобия, обеспечивающий повышение адекватности моделирования реальному процессу деформации металла.

Обоснован подход к использованию информационной модели как базового элемента цифрового двойника волочильного процесса, позволяющий осуществлять виртуальное воспроизведение режимов деформации, анализ отклонений технологических параметров и прогнозирование качества готовой продукции в зависимости от условий обработки.

Показано, что учет совокупности физических эффектов и их иерархическая структуризация позволяет повысить точность описания процесса волочения и создать основу для разработки интеллектуальных систем управления ресурсосберегающего типа.

Обзор современных подходов к моделированию процесса волочения и концепции цифрового двойника. Процесс волочения проволоки относится к числу сложных технологических процессов обработки металлов давлением, характеризующихся нелинейным взаимодействием механических, тепловых и трибологических явлений. В классических работах по обработке металлов давлением

=====

данный процесс рассматривается как результат пластической деформации, сопровождающейся изменением геометрических параметров заготовки, перераспределением напряженно-деформированного состояния и формированием структурных изменений в материале. При этом основное внимание уделяется расчету силы волочения, степени обжатия, коэффициента трения и тепловых эффектов, возникающих в зоне контакта металла с инструментом.

Традиционные модели волочения основаны на аналитических и полуэмпирических зависимостях, описывающих локальные параметры процесса. Однако данные подходы, как правило, не учитывают комплексное влияние взаимосвязанных факторов, включая неоднородность материала, динамические колебания технологической системы, износ волочильного инструмента, а также изменение условий трения в процессе эксплуатации оборудования. Это приводит к ограниченной точности прогнозирования параметров готовой продукции и снижению эффективности управления технологическим процессом.

В последние годы активно развиваются методы системного моделирования технологических процессов, основанные на интеграции физических, информационных и вычислительных моделей. В рамках данного направления технологический процесс рассматривается как многосвязная система «материал – инструмент – оборудование», в которой выходные параметры формируются под воздействием совокупности взаимосвязанных физических эффектов. Такой подход позволяет переходить от локального описания отдельных явлений к системному анализу процесса в целом.

Особое значение приобретают методы информационного моделирования, позволяющие формализовать структуру технологического процесса и выделить иерархию физических эффектов, определяющих качество готовой продукции. В таких моделях технологический процесс представляется как совокупность взаимосвязанных параметров сырья, оборудования, энергетических потоков и режимов обработки, что создает основу для построения вычислительных моделей и алгоритмов управления.

Современным этапом развития данных подходов является концепция цифрового двойника технологического процесса. Цифровой двойник представляет собой динамически обновляемую виртуальную модель реального объекта, функционирующую на основе данных мониторинга и математического описания физических процессов. В отличие от классических симуляционных моделей, цифровой двойник обеспечивает двустороннюю связь между физической системой и её виртуальным представлением, что позволяет осуществлять не только анализ, но и прогнозирование, а также оптимизацию технологических режимов в режиме реального времени.

В научных исследованиях последних лет цифровые двойники рассматриваются как основа интеллектуальных производственных систем, обеспечивающих предиктивную

=====
диагностику, адаптивное управление и повышение энергоэффективности технологических процессов. В частности, для процессов обработки металлов давлением цифровые двойники позволяют учитывать изменение свойств материала, состояние инструмента, параметры теплообмена и динамику оборудования, что существенно повышает точность моделирования и управления.

Несмотря на значительные достижения в данной области, существующие модели цифровых двойников для процессов волочения остаются недостаточно развитыми. Основные ограничения связаны с отсутствием детализированной иерархии физических эффектов, недостаточной интеграцией энергетических и механических моделей, а также слабой связью между информационными параметрами процесса и качественными характеристиками готовой продукции.

Таким образом, анализ современного состояния исследований показывает необходимость разработки комплексной информационной модели процесса волочения, которая может служить основой формирования цифрового двойника и обеспечивать системное описание взаимосвязи физических эффектов, технологических параметров и показателей качества продукции.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ (МЕТОДИКА РАБОТЫ)

Повышение эффективности кабельного производства рассматривается в рамках ресурсосберегающего подхода к организации процесса волочения, основанного на комплексном анализе механических, трибологических и энергетических закономерностей пластической деформации металла.

Методологической основой исследования является представление процесса волочения как системы последовательных стадий упругопластической деформации, в ходе которой происходит изменение геометрических параметров проволоки за счёт удлинения в осевом направлении и соответствующего уменьшения поперечного сечения (рис.1) . При этом установлено, что в очаге деформации формируется сложное напряженно-деформированное состояние, обусловленное совместным действием растягивающих напряжений и касательных напряжений, возникающих вследствие контактного трения между поверхностью металла и волочильным инструментом. Данные процессы приводят к дополнительному сдвиговому деформированию материала, оказывающему существенное влияние на конечные свойства проволоки.

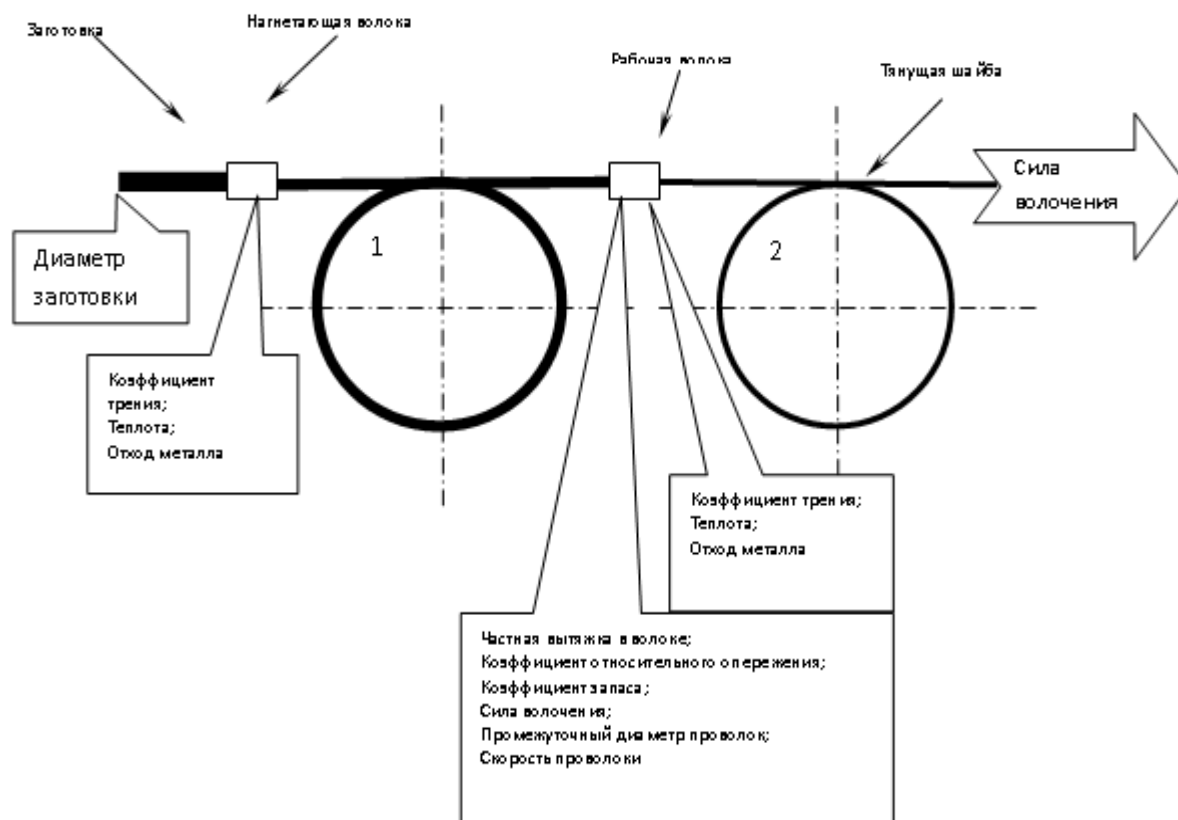


Рис.1. Модель технологического процесса волочения

Снижение энергетических потерь и повышение качества проволоки достигается путем управления условиями трения в зоне контакта, в том числе за счет применения смазочных материалов (эмульсий). Смазка обеспечивает уменьшение коэффициента трения, снижение тепловыделения, повышение стабильности процесса деформации и уменьшение износа волочильного инструмента, что в совокупности позволяет реализовать более высокие степени обжатия без ухудшения качества готового изделия.

Технологический объект — волочильная машина — рассматривается как сложный электромеханический комплекс, включающий систему взаимосвязанных узлов, обеспечивающих формирование, транспортирование и калибрование проволоки. Производительность данного комплекса определяется количеством выпускаемой продукции в единицу времени и зависит от стабильности технологического режима. Существенное влияние на производительность оказывают вынужденные остановки оборудования, связанные с заменой исходных бухт, обрывами проволоки, износом инструмента и переналадкой технологической линии.

С целью повышения эффективности процесса рассматривается комбинированный способ волочения, основанный на совмещении фильерного и бесфильерного

деформирования. Данный подход позволяет перераспределить деформационную нагрузку, снизить контактные напряжения в очаге деформации и увеличить ресурс волоочильного инструмента, что обеспечивает повышение экономической эффективности процесса за счет снижения эксплуатационных затрат и увеличения срока службы оборудования.

Реализация указанного подхода требует конструктивной модернизации волоочильной машины за счет введения вспомогательного блока, создающего дополнительное растягивающее усилие на выходе проволоки из чистой фильеры. Формирование дополнительного натяжения обеспечивает стабилизацию геометрических параметров готовой продукции, в частности диаметра проволоки, и повышение точности соответствия требованиям нормативной документации.

Оценка целесообразности внедрения предложенного технического решения осуществляется на основе комплексного моделирования, включающего два взаимосвязанных этапа:

Разработка информационной (виртуальной) модели существующей и модернизированной технологии волочения (рис. 2), обеспечивающей формализацию структуры процесса, выделение ключевых физических эффектов и описание взаимосвязей между технологическими параметрами;

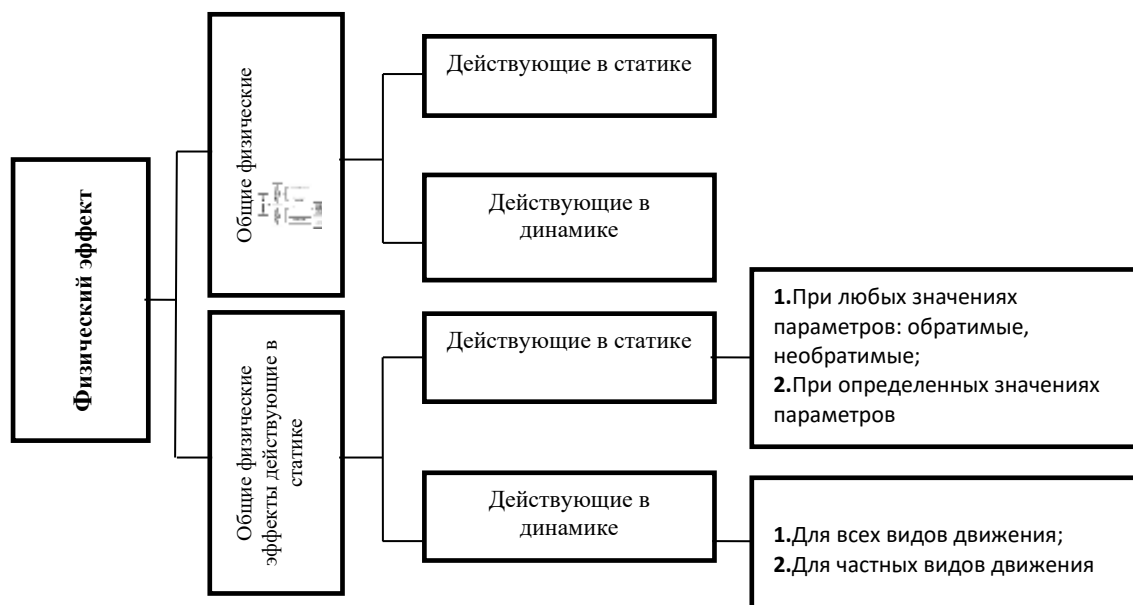


Рис.2 Схема создания информационной модели, построенной на базе поэтапного отбора данных из соответствующих физических эффектов.

Построение математической модели волоочильной машины как объекта управления, учитывающей динамику процесса, энергетические потоки, параметры деформации и влияние конструктивных изменений на показатели качества продукции.

Предложенная методика обеспечивает возможность перехода от эмпирического анализа процесса к системному моделированию, основанному на количественном описании взаимосвязей между параметрами оборудования, режимами деформации и качественными характеристиками готовой проволоки.

Полученные результаты. В результате проведенных исследований разработана структурированная информационная модель процесса волочения, обеспечивающая формализацию технологической последовательности операций и описание взаимосвязей между параметрами сырья, оборудования, режимами деформации и качественными характеристиками готовой продукции.

Установлено, что предложенная модель позволяет представить технологический процесс как совокупность взаимосвязанных блоков, включающих входные параметры сырья (C1, C2), режимные параметры процесса (C3), выходные качественные характеристики продукции (C4, C5), а также ресурсные и технологические составляющие системы (J1, J2, H, Q1, Q2). Такая структура обеспечивает системный учет материальных, энергетических и технологических потоков, формирующихся в процессе волочения.

Анализ функционирования модели показал, что качество готовой проволоки определяется устойчивостью параметров системы, среди которых ключевыми являются диаметр изделия, стабильность геометрических характеристик и однородность структуры материала. Установлено, что отклонение любого из контролируемых параметров от заданных нормативных значений приводит к формированию дефектов продукции, включая отклонения по диаметру, овальность поперечного сечения, наличие технологических отходов и заправочных концов, что подтверждает критическую значимость параметрической устойчивости процесса.

Показано, что технологический процесс волочения целесообразно рассматривать как последовательную цепь энергетически связанных этапов, в ходе которых металл последовательно подвергается воздействию механических и тепловых нагрузок. При этом определяющее влияние на формирование выходных характеристик оказывают три основных элемента системы: тянущий орган (шайба), волочильный инструмент и обрабатываемый материал. Тянущий орган формирует усилие волочения, определяющее уровень продольной деформации; волочильный инструмент обеспечивает калибрование геометрии и формирование качества поверхности; обрабатываемый металл выступает как носитель деформации и связующее звено энергетического взаимодействия всей системы.

На основе анализа установлено, что разработанная информационная модель обеспечивает возможность количественного описания параметров процесса через совокупность технологических коэффициентов, включая частную вытяжку в волоке (μ), коэффициент относительного опережения (τ_p), коэффициент запаса (k_z), силу волочения (P_z), промежуточный диаметр проволоки (d_r), а также скоростные

параметры (V_r , V_{r-1}). Данные параметры позволяют формализовать состояние процесса и использовать модель для оценки устойчивости технологического режима.

Отмечено, что применение информационной модели создаёт основу для анализа и последующей оценки комбинированной технологии фильерного и бесфильтерного волочения. При этом появляется возможность прогнозирования влияния дополнительного растягивающего усилия на стабильность диаметра проволоки и нагрузку на оборудование, что особенно важно при оценке рисков отказов и аварийных ситуаций в технологической системе.

Вывод. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что разработанная информационная модель обеспечивает системное описание процесса волочения, повышает уровень его формализации и создаёт предпосылки для дальнейшего перехода к цифровому моделированию и управлению технологическим процессом на основе принципов теории подобия и системного анализа.

Список литературы

1. Александров Л.В., Шепелев Н.П. *Моделирование — этап создания эффективных технических решений*. — М.: НПО «Поиск», 1992.
2. Красильников Л.А., Лысенко А.Г. *Волокнители проволоки*. — М.: Metallurgia, 1987.
3. Эйгенсон Л.С. *Моделирование*. — М.: Советская наука, 1952.
4. Патент Республики Узбекистан на полезную модель № FAR 00659 от 22.07.2010 г. «Волокнительная машина».
5. Калмыков А.В., Кудрин В.А. *Обработка металлов давлением: теория и технология*. — М.: Metallurgia, 2008.
6. Минаев А.А., Кузнецов В.Г. *Теория пластической деформации металлов*. — М.: Машиностроение, 2010.
7. Розенберг А.М., Ефимов В.А. *Технология волочения и прокатки металлов*. — М.: Metallurgia, 2005.
8. Altan T., Oh S., Gegel H. *Metal Forming: Fundamentals and Applications*. — ASM International, 2005.
9. Hosford W.F. *Mechanical Behavior of Materials*. — Cambridge University Press, 2010.
10. Kalpakjian S., Schmid S.R. *Manufacturing Engineering and Technology*. — Pearson, 2014.
11. Groover M.P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. — Wiley, 2015.
12. Boyer H.E. *Atlas of Stress-Strain Curves*. — ASM International, 2002.
13. Tao F., Qi Q. *Make more digital twins*. — Nature, 2019.

=====

14. Grieves M., Vickers J. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. — 2017.

15. Kritzinger W. et al. *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review*. — IFAC-PapersOnLine, 2018.

16. ISO 23247: *Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing*. — International Organization for Standardization, 2021.