

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Рожков Максим Игоревич

Влияние волнового эффекта на устойчивость цепей поставок продукции с ограниченным
сроком годности

РЕЗЮМЕ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата наук по менеджменту

Научный руководитель:
д.э.н., профессор
Сергеев Виктор Иванович

Москва – 2022

1. ВВЕДЕНИЕ

Постановка научной проблемы и обоснование ее актуальности. Количество внешних факторов, существенно влияющих на устойчивость (resilience) цепей поставок, растет ежегодно. Согласно исследованию компании Resilinc, 97% международных компаний сталкивались со значительными сбоями в цепи поставок в 2020 году. Данная величина выросла на 67% по сравнению со значением за 2019 год¹. Сложность работы со сбоями в современных цепях поставок связана с конфигурацией логистической сети, процессами и особенностями продукции. Следует также заметить, что различные виды сбоев в цепях поставок имеют различные механизмы воздействия. Один из примеров комплексного нетипичного влияния – это последствия пандемии COVID-19, которые продемонстрировали зависимость цепей поставок от воздействия внешних негативных факторов. В данном случае сбои в работе блокировали цепи поставок целых регионов в разные периоды. Подобно тому, как эпидемия в общем случае распространяется волнами, также и, начиная с первых месяцев воздействия рискованного события, наблюдалась значительная диспропорция в балансе спроса, поставок и доступных производственных мощностей. Возможность прогнозировать развитие рискованных факторов также была ограниченной. Среди других известных причин значительных сбоев в работе цепей поставок за последние несколько лет можно назвать ураган Сенди в 2012 или цунами около побережья Японии в 2011. Усложнение воздействия негативных рискованных событий приводит к пересмотру составляющих устойчивости цепей поставок.

Понятие устойчивости цепей поставок трансформируется по мере увеличения количества работ, посвященных данной теме. Некоторые исследователи выделяют отдельный термин «жизнеспособность» (viability)². Данное понятие развивает изначальное значение с большим фокусом на долгосрочное функционирование цепей поставок и взаимодействие с «внешним» миром, с учетом социальных и экологических факторов. Расширение круга изучаемых задач благоприятствует применению оптимизационных инструментов и созданию цифровых двойников цепей поставок, поскольку способность эффективно предсказывать основные сценарии воздействия рискованных событий критически важна для оценки долгосрочной динамики работы цепи поставок.

¹ Resilinc. Resilinc 2020 Annual Report. Carpe Diem / Resilinc. – 2020. URL: <https://www.resilinc.com/learning-center/white-papers-reports/> (дата обращения: 25.04.2022).

² Ivanov, D. Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives – lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic / D. Ivanov // Annals of Operations Research. – 2020. – P. 337–357.

Один из подобных важных негативных долгосрочных факторов – это высокий уровень списания продукции в цепях поставок. Риски списания являются значительной проблемой даже без учета задачи повышения устойчивости цепей поставок, доля списаний может превысить 30%^{3,4} от изначально произведенных товаров некоторых продуктовых групп. Некорректные прогнозы спроса, недостаток координации в цепях поставок и ограниченный срок годности – это важные факторы, влияющие на уровень списаний⁵.

Одна из составляющих динамики цепей поставок – это процесс распространения негативных последствий от сбоя в работе (внешнего или внутреннего), обозначаемый как «волновой эффект» (“ripple effect”). Данный эффект оказывает существенное влияние на производительность цепи поставок на всех стадиях влияния негативного события. Волновой эффект проявляется в различной степени в зависимости от конфигурации цепи поставок и условий внешней среды.

Начальное распространение рискованного события, а также стабилизация цепи поставок после восстановления – это сложные динамические процессы, для описания которых используются различные статистические методы⁶, методы исследования операций^{7,8}, а также имитационное моделирование^{9,10}.

Все три базовые парадигмы имитационного моделирования в различных комбинациях используются для исследований в области устойчивости цепей поставок: системная

³ Rodrigues, V.S. Measurement, mitigation and prevention of food waste in supply chains: An online shopping perspective / V.S. Rodrigues, E. Demir, X. Wang // *Industrial Marketing Management*. – 2021. – Vol. 93. – P. 545–562.

⁴ Buzby, J.C. Supermarket loss estimates for fresh fruit, vegetables, meat, poultry, and seafood and their use in the ERS loss-adjusted food availability data / J.C. Buzby, H.F. Wells, B. Axtman, J. Mickey // *United States Department of Agriculture, Economic Information Bulletin*. – 2009. – Vol. 44. – P. 1–20.

⁵ Moraes, C.C. Retail food waste: mapping causes and reduction practices / C.C. Moraes, F.H. Oliveira Costa, C. Roberta Pereira, A.L. da Silva, I. Delai // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 256. – P. 120–124.

⁶ Hosseini, S. A new resilience measure for supply networks with the ripple effect considerations: a Bayesian network approach / S. Hosseini, D. Ivanov // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–27.

⁷ Snyder, L.V. Reliability models for facility location: The expected failure cost case / L.V. Snyder, M.S. Daskin // *Transportation Science*. – 2005. – Vol. 39. – P. 400–416.

⁸ Snyder, L.V. OR/MS models for supply chain disruptions: A review / L.V. Snyder, Z. Atan, P. Peng, Y. Rong, A.J. Schmitt, B. Sinsoysal // *IIE Transactions*. – 2016. – Vol. 48. – N 2. – P. 89–109.

⁹ Carvalho, H. Agile and resilient approaches to supply chain management: Influence on performance and competitiveness / H. Carvalho, S.G. Azevedo, V. Cruz-Machado // *Logistics Research*. – 2012. – Vol. 4. – N 1–2. – P. 49–62.

¹⁰ Schmitt, A.J. A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain / A.J. Schmitt, M. Singh // *International Journal of Production Economics*. – 2012. – Vol. 139. – P. 22–32.

динамика^{11,12}, дискретно-событийное моделирование¹³, мультиагентное моделирование^{14,15,16}.

Большая часть статей, посвященных проявлению волнового эффекта, была опубликована в период с 2014 года^{17,18}. Волновой эффект можно охарактеризовать как одну из динамических составляющих концепции устойчивости цепей поставок, сформулированную в работах 2003–2005 годов^{19,20,21}. Понятие устойчивости цепей поставок (supply chain resilience) опирается на аналогичные исследования в таких областях, как теория систем²², экология²³, психология и геология, выполненные в 1940–1970-х годах²⁴. В целом устойчивость можно охарактеризовать как способность после значительного негативного воздействия (рискового события или сбоя в работе) возвращаться в состояние, сопоставимое по эффективности состоянию до возникновения негативного события.

При управлении цепями поставок есть следующие опции по обработке негативного рискового события: подготовить дополнительные мощности заранее (проактивная стратегия), использовать альтернативные источники снабжения (реактивная стратегия) или

¹¹ Olivares-Aguila, J. System dynamics modelling for supply chain disruptions / J. Olivares-Aguila, W. ElMaraghy // *International Journal of Production Research*. – 2021. – Vol. 59. – N 6. – P. 1757–1775.

¹² Llaguno, A. State of the art, conceptual framework and simulation analysis of the ripple effect on supply chains / A. Llaguno, J. Mula, F. Campuzano-Bolarin // *International Journal of Production Research*. – 2021. – P. 1–23.

¹³ Carvalho, H. A supply chain redesign for resilience using simulation / H. Carvalho, A.P. Barroso, V.H. Machado, S. Azevedo, V. Cruz-Machado // *Computers and Industrial Engineering*. – 2012. – Vol. 62. – P. 329–341.

¹⁴ Ivanov, D. Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability: a simulation study / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2018. – Vol. 56. – N 10. – P. 3507–3523.

¹⁵ Singh, S. Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain / S. Singh, R. Kumar, R. Panchal, M.K. Tiwari // *International Journal of Production Research*. – 2021. – Vol. 59. – N 7. – P. 1993–2008.

¹⁶ Nair, A. Supply network topology and robustness against disruptions – an investigation using multi-agent model / A. Nair, J.M. Vidal // *International Journal of Production Research*. – 2011. – Vol. 49. – N 5. – P. 1391–1404.

¹⁷ Ivanov, D. Optimal distribution (re)planning in a centralized multistage supply network under conditions of the ripple effect and structure dynamics / D. Ivanov, A. Pavlov, B. Sokolov // *European Journal of Operational Research*. – 2014. – Vol. 237. – P. 758–770.

¹⁸ Scheibe, K.P. Supply chain disruption propagation: a systemic risk and normal accident theory perspective / K.P. Scheibe, J. Blackhurst // *International Journal of Production Research*. – 2018. – Vol. 56. – N 1–2. – P. 43–59.

¹⁹ Rice, J.B. Building a secure and resilient supply network / J.B. Rice, F. Caniato // *Supply Chain Management Review*. – 2003. – Vol. 7. – P. 22–30.

²⁰ Sheffi, Y. A supply chain view of the resilient enterprise / Y. Sheffi, J. Rice // *MIT Sloan Management Review*. – 2005. – Vol. 47. – P. 41–48.

²¹ Kleindorfer, P.R. Managing Disruption Risks in Supply Chains / P.R. Kleindorfer, G.H. Saad // *Production and Operations Management*. – 2005. – Vol. 14. – N 1. – P. 53–68.

²² Zhao, K. Modelling supply chain adaptation for disruptions: An empirically grounded complex adaptive systems approach / K. Zhao, Z. Zuo, J.V. Blackhurst // *Journal of Operations Management*. – 2019. – Vol. 65. – N 2. – P. 190–212.

²³ Bodin, P. Resilience and other stability concepts in ecology: Notes on their origin, validity, and usefulness / P. Bodin, B. Wiman // *ESS bulletin*. – 2004. – Vol. 2. – N 2. – P. 33–43.

²⁴ Holling, C.S. Resilience and stability of ecological systems / C.S. Holling // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 1973. – Vol. 4. – P. 1–23.

же не использовать никаких контрмер. Имитационное моделирование позволяет проанализировать как реактивные, так и проактивные стратегии.

Согласно исследованию работ, опубликованных до 2017 года и посвященных оценке устойчивости цепей поставок²⁵, подходы, основанные на применении имитационного моделирования, в наибольшей степени приспособлены для анализа в режиме реального времени. Также этот метод эффективен для задач с большим количеством параметров, влияющих на восстановление цепи поставок после сбоя. В большей части исследований, посвященных волновому эффекту, соблюдается баланс между размером изучаемой сети и детализацией процессов. В обзорной работе посвященной анализу публикаций за период 2017–2019 гг.²⁶ особо подчеркивается, что в литературе в настоящий момент нет единого определения волнового эффекта, но при этом общий консенсус относительно данного термина сформирован. Также прослеживается тренд на использование искусственного интеллекта и машинного обучения в этой области знаний.

Можно выделить три основных компонента устойчивости цепей поставок²⁷, «линии обороны» ("lines of defense"): поглощающая мощность (absorptive capacity), адаптивная мощность (adaptive capacity) и восстановительная мощность (restorative capacity). Данная классификация может быть использована для группировки существующих исследований по данной теме. Рассмотрение всех трех видов мощностей требует формулировки сложной целевой функции при оптимизации. Таким образом, данная задача может быть решена с использованием динамического моделирования.

Распространение последствий дестабилизирующего события может вызывать неявное взаимодействие звеньев цепи, его сложно прогнозировать и моделировать. Волновой эффект в цепях поставок можно рассматривать в контексте фреймворка устойчивости цепей поставок, состоящего из трех слоев: сетевая структура, планирование процессов (proactive проактивные меры), оперативный контроль (reactive реактивные меры)²⁸. Прямое распространение последствий сбоя в цепи поставок исследовано в наибольшей степени и представлено во многих работах. При этом в ряде случаев сбой в работе промежуточного эшелона цепи поставок может вызвать нестабильность всей цепи.

²⁵ Ivanov, D. Literature review on disruption recovery in the supply chain / D. Ivanov, A. Dolgui, B. Sokolov, M. Ivanova // *International Journal of Production Research*. – 2017. – Vol. 55. – N 20. – P. 6158–6174.

²⁶ Golan, M.S. Trends and applications of resilience analytics in supply chain modeling: systematic literature review in the context of the COVID-19 pandemic / M.S. Golan, L.H. Jernegan, I. Linkov // *Environment systems & decisions*. – 2020. – Vol. 40. – P. 222–243.

²⁷ Hosseini, S. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis / S. Hosseini, D. Ivanov, A. Dolgui // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2019. – Vol. 125. – P. 285–307.

²⁸ Dolgui, A. Ripple effect and supply chain disruption management: new trends and research directions / A. Dolgui, D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2021. – Vol. 59. – N 1. – P. 102–109.

Направление «волн» воздействия негативного события в цепи поставок может быть и обратным (в сторону поставщиков сырья)²⁹. Особенности распространения данного эффекта зависят от динамики и конфигурации логистической сети и могут проявляться по-разному на различных стадиях сбоя. Данный подход «закрытого цикла» может быть реализован несколькими способами, но почти всегда требует построения сложных оптимизационных моделей или дополнительного разделения задачи на составляющие. Например, модель линейного программирования может быть декомпозирована на две части: основная модель и модель восстановления сети, для каждой из которых оптимизация параметров выполняется отдельно³⁰.

Можно выделить следующий тренд: чем сложнее динамика системы или чем специфичнее влияние отдельных параметров, тем чаще применяется имитационное моделирование. Данное утверждение также верно для ситуаций увеличения размерности задачи. Устойчивость цепей поставок тесно связана с соотношением «Эффективность/Избыточность» по аналогии с соотношением «Затраты/Уровень сервиса»^{31,32}. Кроме того, увеличение уровня запаса, а также перераспределение запаса внутри сети – это одна из важных составляющих устойчивости цепей поставок. Ограниченный срок годности продукции и риски списания приводят к увеличению сложности алгоритмов планирования запасов, так как стратегия превентивного увеличения уровня запаса может быть использована ограниченно.

Важные особенности управления цепями поставок продукции с ограниченным сроком годности: риски списания продукции, а также сегментация клиентов по требованиям к остаточному сроку годности^{33,34}. При сбоях в работе звеньев логистической сети эти характеристики оказывают существенное влияние на процесс функционирования цепи поставок³⁵. Алгоритмы планирования поставок продукции с ограниченным сроком

²⁹ Li, Y. Ripple Effect in the Supply Chain Network: Forward and Backward Disruption Propagation, Network Health and Firm Vulnerability / Y. Li, K. Chen, S. Collignon, D. Ivanov // *European Journal of Operational Research*. – 2021. – Vol. 291. – N 3. – P. 1117–1131.

³⁰ Goldbeck, N. Optimal supply chain resilience with consideration of failure propagation and repair logistics / N. Goldbeck, P. Angeloudis, W. Ochieng // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2020. – Vol. 133. – N 101830. – P. 1–20.

³¹ Carvalho, H. A supply chain redesign for resilience using simulation / H. Carvalho, A.P. Barroso, V.H. Machado, S. Azevedo, V. Cruz-Machado // *Computers and Industrial Engineering*. – 2012. – Vol. 62. – P. 329–341.

³² Ivanov, D. Optimal distribution (re)planning in a centralized multistage supply network under conditions of the ripple effect and structure dynamics / D. Ivanov, A. Pavlov, B. Sokolov // *European Journal of Operational Research*. – 2014. – Vol. 237. – P. 758–770.

³³ Blackburn, J. Supply chain strategies for perishable products: The case of fresh produce / J. Blackburn, G. Scudder // *Production and Operations Management*. – 2009. – Vol. 18. – N 2. – P. 129–137.

³⁴ Ferguson, M. Information Sharing to Improve Retail Product Freshness of Perishables / M. Ferguson, M.E. Ketzenberg // *Production and Operations Management*. – 2006. – Vol. 15. – N 1. – P. 57–73.

³⁵ Pahl, J. Integrating deterioration and lifetime constraints in production and supply chain planning: A survey / J. Pahl, S. Voß // *European Journal of Operational Research*. – 2014. – Vol. 238. – N 3. – P. 654–674.

годности должны принимать во внимание не только физическое отсутствие продукции, но и требования и особенности клиентов, которые приобретают данные товары³⁶. Таким образом можно разграничить понятия номинального срока годности и реального срока, в течение которого возможно осуществить продажи.

Базовые алгоритмы планирования поставок продукции с ограниченным сроком годности были сформулированы в период 1972–1981³⁷. Специальным вариантам постановки задачи посвящено большое количество работ с использованием метода исследования операций^{38,39}. При ограничении срока годности продукции часть мер по снижению негативного воздействия сбоя в цепи поставок оказываются значительно менее эффективными, например, дополнительный запас продукции приводит к росту рисков списания продукции. По этой причине анализ динамики цепей поставок подобного типа является перспективной областью изучения.

Оптимизационные модели для учета ограничений по сроку годности продукции могут быть составной частью систем расширенного планирования APS (advanced planning & scheduling)⁴⁰. Основные методы, используемые для оптимизации планирования поставок продукции с ограниченным сроком годности: аналитические методы, исследование операций, имитационное моделирование и эмпирические исследования⁴¹.

Политики отгрузки запаса (priority scheduling/issuing policies in inventory management) – это отдельное направление среди исследований в области управления запасами с ограниченным сроком годности^{42,43}. В большинстве случаев FIFO (First In – First Out) (Первый входит – первый выходит) демонстрирует более высокую производительность с точки зрения величины общих затрат⁴⁴.

³⁶ Amorim, P. Managing perishability in production–distribution planning: A discussion and review / P. Amorim, H. Meyr, C. Almeder, B. Almada-Lobo // *Flexible Services and Manufacturing Journal*. – 2013. – Vol. 25. – N 3. – P. 389–413.

³⁷ Nahmias, S. Perishable Inventory Theory: A Review / S. Nahmias // *Operations Research*. – 1982. – Vol.30. – N 4. – P. 680–708.

³⁸ Goyal, S.K. Recent trends in modeling of deteriorating inventory / S.K. Goyal, B.C. Giri // *European Journal of Operational Research*. – 2001. – Vol. 134. – N 1. – P. 1–16.

³⁹ Bakker, M. Review of inventory systems with deterioration since 2001 / M. Bakker, J. Riezebos, R.H. Teunter // *European Journal of Operational Research*. – 2012. – Vol. 221. – N 2. – P. 275–284.

⁴⁰ Lütke Entrup, M. Advanced Planning in Fresh Food Industries. Integrating Shelf Life into Production Planning / M. Lütke Entrup; – Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg, 2005. – 216 p.

⁴¹ Haijema, R. Solving large structured Markov Decision Problems for perishable inventory management and traffic control / R. Haijema; Dissertation, Amsterdam. University of Amsterdam (UvA). – URL: https://pure.uva.nl/ws/files/4314821/59982_thesis.pdf (дата обращения: 25.04.2022).

⁴² Pierskalla, W.P. Optimal Issuing Policies for Perishable Inventory / W.P. Pierskalla, C.D. Roach // *Management Science*. – 1972. – Vol. 18. – N 11. – P. 603–614.

⁴³ Cohen, M.A. Critical number ordering policy for LIFO perishable inventory systems / M.A. Cohen, G.P. Prastacos // *Computers & Operations Research*. – 1981. – Vol. 8. – N 3. – P. 185–195.

⁴⁴ Parlar, M. FIFO Versus LIFO Issuing Policies for Stochastic Perishable Inventory Systems / M. Parlar, D. Perry, W. Stadje // *Methodology and Computing in Applied Probability*. – 2011. – Vol. 13. – N 2. – P. 405–417.

Проектирование логистической сети для продукции с умеренными рисками списания подразумевает большое количество возможных конфигураций. Срок годности продукции может быть достаточно продолжителен, чтобы запас продукции был представлен многомерным вектором (размерности: количество единиц продукции в партии запаса, период производства), но риски списания были относительно низкие. Но при такой конфигурации изменения в структуре сети или процессах, вызванные сбоем в работе цепи поставок, могут приводить к резкому росту списаний.

В частности, политика LEFO (Last Expired – First Out) (Последний истекает – первый выходит) также применяется на практике и во многом схожа с LIFO (Last In – First Out) (Последний входит – первый выходит). Данная политика ограничено влияет на уровень сервиса, но напрямую связана с уровнем затрат на списание. Использование данной политики отгрузки запасов часто сопряжено с более высоким уровнем списания продукции. Поэтому увеличение запаса не приводит к улучшению производительности системы. Ограничение по сроку годности продукции приводит к тому, что отгрузки для компенсации дефицита поставок предыдущих периодов (backlog) практически неприменимы, несмотря на то что они подходят для продукции без ограничений по сроку годности, а также детально изучены и часто применяются в исследованиях, посвященных устойчивости цепей поставок. Компенсация данного отложенного спроса – это один из факторов, который приводит к снижению волнового эффекта на этапах восстановления и стабилизации цепи поставок.

Сочетание факторов ограниченного срока годности продукции и подверженности цепи поставок сбоям обуславливает применение сложных аналитических методов и методов моделирования. В частности, имитационное моделирование используется для описания как динамики цепей поставок при сбоях, так и систем управления запасами с ограниченным сроком годности. Другие часто используемые методы: байесовские сети, модели смешанной целочисленной оптимизации. Имитационное моделирование обладает преимуществом в виде возможности описания процесса при заданном уровне детализации. Таким образом, данный метод позволяет более точно описать составляющие реакции цепи поставок на негативное воздействие.

Основные направления исследований устойчивости в логистике и управлении цепями поставок: оценка влияния структуры цепей поставок, использование различных методов смягчения негативного воздействия сбоев и способов подготовки цепи поставок к возможному негативному воздействию. Таким образом, устойчивость формируется на нескольких взаимосвязанных уровнях: структура, процессы и операции. В более поздних

работах большое внимание уделяется изучению устойчивости в контексте современных цифровых технологий.

Обратная связь системы, формирующаяся при волновом эффекте, делает возможным сравнение с другим известным феноменом в динамике цепей поставок – «эффектом хлыста» (bullwhip effect)⁴⁵. Например, для анализа поведения участников цепи поставок и координирования распространения информации о сбое в цепи поставок используются контролируемые эксперименты на основе бизнес симулятора «MIT beer game»^{46,47}. В посвященных данному симулятору исследованиях подробно описана ценность обмена информацией со стороны снабжения для снижения влияния сбоя на рост эффект хлыста в цепи поставок.

Перспективные направления для исследований волнового эффекта: анализ взаимосвязи сетевой структуры цепей поставок и оптимальных способов снижения влияния волнового эффекта, моделирование распространения негативного влияния сбоя в многоэшелонных цепях поставок, взаимосвязь волнового эффекта и других факторов неопределенности. Фактор ограниченного срока годности оказывает существенное влияние на этапе восстановления цепи поставок после сбоя, но не был подробно рассмотрен в ранних работах, посвященных устойчивости цепей поставок. Кроме того, большая часть исследований фокусируется на вопросах предотвращения сбоев в цепи поставок, а также на снижении воздействия в период действия негативного рискового события. При этом процесс стабилизации цепи поставок изучен в меньшей степени (рисунок 1).

⁴⁵ Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for Complex World / J.D. Sterman; – Boston: McGraw-Hill, 2000. – 1008 p.

⁴⁶ Sarkar, S. A Behavioral Experiment on Inventory Management with Supply Chain Disruption / S. Sarkar, S. Kumar // International Journal of Production Economics. – 2015. – Vol. 169 (C). – P. 169–178.

⁴⁷ Forrester, J. Industrial Dynamics A Major Breakthrough for Decision Makers/ J. Forrester // Harvard Business Review. – 1958. – Vol. 36. – P. 37–66.

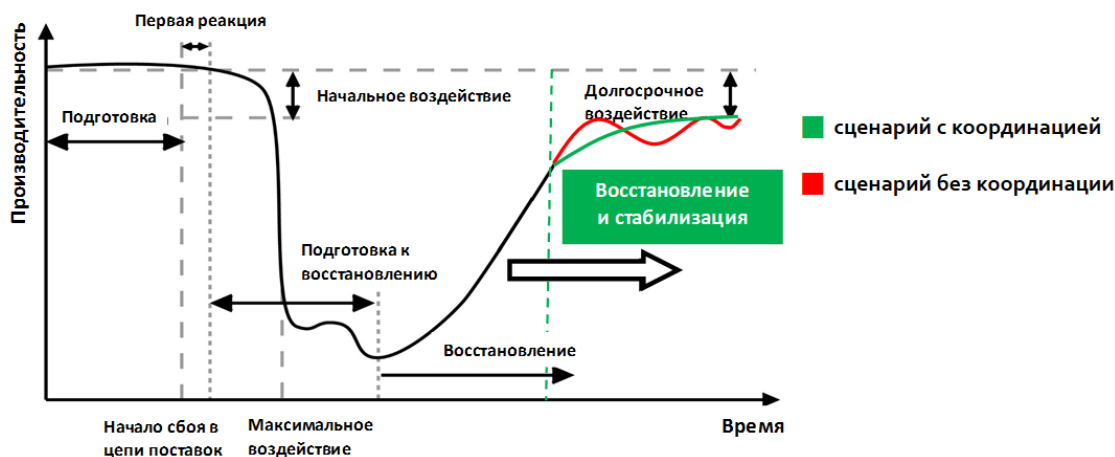


Рисунок 1 – Стадии воздействия негативного рискового события на работу цепи поставок

Источник: составлено автором.

Насколько известно автору, данное диссертационное исследование является первым в следующих составляющих:

1. Сформулировано понятие отложенной избыточности и проанализированы метрики для оценки процесса стабилизации ЦП;
2. Показано, что волновой эффект может быть драйвером эффекта хлыста, а также то, что появление эффекта хлыста может быть обусловлено значительным сбоем, даже несмотря на то, что распространение последствий сбоя направлено в сторону конечных потребителей;
3. Рассмотрена специфика распространения волнового эффекта при различных политиках отгрузки продукции с ограниченным сроком годности.

Объектом диссертационного исследования являются цепи поставок предприятий пищевой промышленности и сетевой розничной торговли.

Предметом диссертационного исследования является исследование влияния волнового эффекта на параметры системы управления запасами цепей поставок предприятий пищевой промышленности и сетевой розничной торговли.

Целью диссертационного исследования является оптимизация параметров системы управления запасами цепей поставок продукции с ограниченным сроком годности за счет нивелирования последствий волнового эффекта.

Достижению цели диссертационного исследования способствовали разработка и решение следующих задач:

1. Провести анализ теоретических разработок отечественных и зарубежных исследователей, посвященных волновому эффекту в цепях поставок и устойчивости цепей поставок;

2. Разработать и апробировать имитационную модель, комбинирующую использование мультиагентного и дискретно-событийного подхода для оценки воздействия волнового эффекта;
3. Провести анализ влияния цикла заказа на производительность цепи поставок после окончания сбоя в работе и определить показатели для отслеживания данного воздействия;
4. Выявить взаимосвязь между волновым эффектом и «эффектом хлыста» и разработать метрики для описания данного типа взаимодействия;
5. Провести анализ эффективности управления запасами для снижения влияния волнового эффекта в цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности при различных конфигурациях цепи поставок и политиках отгрузки запаса.

Методологическая база исследования: теоретические разработки отечественных и зарубежных исследователей, дискретно-событийное имитационное моделирование, мультиагентное имитационное моделирование.

Для решения первой задачи был проведен анализ работ, посвященных вопросам устойчивости цепей поставок, а также подходов к управлению поставками продукции с ограниченным сроком годности. Рассматривались работы, индексированные в междисциплинарных базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Анализ литературы показал, что заключительная фаза воздействия сбоя в цепи поставок – это менее изученная область исследований.

Для решения второй задачи в среде имитационного моделирования AnyLogic была разработана модель цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности. Модель использует комбинированный подход, сочетающий элементы дискретно-событийного и мультиагентного моделирования. Модель обладает модульной структурой с возможностью модификации и последовательно дорабатывалась для работы с различными исследовательскими задачами. Она может быть адаптирована как для компаний розничной торговли (розничные сети), так и для производственных компаний.

Для решения третьей задачи модель была адаптирована под условия кейса компании FMCG сектора (товары народного потребления) и был проведен ряд экспериментов с данной моделью при различных условиях работы. Исследование позволило впервые выявить особенности функционирования цепей поставок продукции с ограниченным сроком годности при возможных сбоях в работе цепей поставок. Функционирование цепей поставок в период воздействия сбоя можно поделить на несколько последовательных стадий. В настоящем исследовании основное влияние уделено периоду восстановления

цепи поставок, когда подверженный сбоям объект вновь функционирует в штатном режиме, но при этом динамика работы цепи поставок все еще отличается от нормального режима работы. Определены метрики для отслеживания данного состояния.

Для решения четвертой задачи с разработанной имитационной моделью был проведен ряд дополнительных экспериментов. В исследовании впервые была рассмотрена взаимосвязь эффекта хлыста и волнового эффекта в цепях поставок. Были описаны основные возможные сценарии влияния данных эффектов друг на друга, а также сформулированы показатели, позволяющие измерить данное влияние количественно.

Для решения пятой задачи имитационная модель была адаптирована для кейса компании сетевой розницы для изучения дополнительных характеристик распространения волнового эффекта. Двухэшелонная версия модели была доработана и расширена: в цепь поставок добавлен еще один эшелон сети распределения и параллельный контур цепи поставок, который может использоваться в качестве альтернативного источника поставок. Алгоритм планирования поставок был модифицирован: добавлена возможность использования различных политик отгрузки запасов. Данные изменения позволили оценить влияние конфигурации логистической сети, реализации алгоритма планирования, а также политики отгрузки запасов на распространение волнового эффекта внутри цепи поставок. Также впервые были рассмотрены особенности воздействия сбоя в работе цепи поставок при использовании различных политик отгрузки запасов.

По результатам диссертационного исследования на защиту выносятся следующие положения:

1. Определены характеристики процесса восстановления цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности, влияющие на её производительность;
2. Волновой эффект и эффект хлыста в цепях поставок взаимосвязаны, данная взаимосвязь может быть количественно оценена;
3. Определена зависимость распространения волнового эффекта от используемой политики отгрузки запаса при различных конфигурациях логистической сети.

Представленные положения характеризуются следующими элементами **научной новизны:**

1. Анализ исследований показал, что модели сбоев в цепи поставок с учетом ограничений сроков годности продукции это недостаточно изученная область;
2. Разработана базовая модель и её модификации для оценки влияния сбоев в работе цепей поставок продукции с ограниченным сроком годности при различных конфигурациях логистических сетей;

3. Впервые при помощи имитационного моделирования выявлены основные особенности характеристик устойчивости цепей поставок продукции с ограниченным сроком годности – определено понятие «отложенной избыточности»;
4. Впервые при помощи имитационного моделирования выявлено взаимное влияние эффекта хлыста и волнового эффекта при сбое в работе цепи поставок и в процессе восстановления работы цепи поставок, а также сформулированы метрики для количественной оценки данного типа влияния;
5. Проанализировано влияние различных политик отгрузок и обработки запасов на распространение волнового эффекта в цепях поставок при сбоях с частичной потерей мощности.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в следующих составляющих:

1. Впервые рассмотрена роль ограниченного срока годности в контексте устойчивости цепей поставок и определен эффект «отложенной избыточности». Данный эффект позволяет количественно оценить влияние координации политик управления производством и размещения заказов как во время воздействия негативного рискованного события, так и сразу после его окончания в процессе восстановления нормального функционирования цепи поставок. Предложен подход к оценке показателей, позволяющий отследить стадии воздействия последствий сбоя в цепи поставок;
2. Насколько известно автору, это первое исследование, посвященное изучению взаимодействия волнового эффекта и эффекта хлыста в условиях продукции с ограниченным сроком годности, стохастического спроса, нескольких политик управления запасами, политик управления производственными партиями и сбоями в работе цепи поставок. Впервые предложена метрика для оценки влияния волнового эффекта на эффект хлыста.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующих составляющих:

1. Для выполнения задач исследования была разработана гибридная имитационная модель, сочетающая элементы дискретно-событийного и мультиагентного моделирования. При работе с имитационной моделью проводился сценарный анализ отдельных конфигураций, а также выполнялся поиск оптимальных значений параметров модели;

2. В исследовании были изучены методы снижения списаний при сохранении устойчивости цепей поставок в условиях ограниченного срока годности продукции при планировании цепей поставок с возможными сбоями в работе производства;
3. Выполнен анализ динамики влияния негативных рисков событий на общую эффективность функционирования цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности.

Апробация результатов и ограничения исследования. Результаты диссертационного исследования были представлены автором на международных конференциях:

16-й симпозиум Международной федерации по автоматическому управлению (IFAC) по проблемам управления информацией в производстве (11–13 июня 2018 г., Бергамо, Италия). Доклад: «Contingency production-inventory control policy for capacity disruptions in the retail supply chain with perishable products».

9-я конференция Международной федерации по автоматическому управлению (IFAC) по производственному моделированию, менеджменту и управлению (28–30 августа 2019 г., Берлинская высшая школа экономики и права, Берлин, Германия). Доклад: «Disruption Tails and Post-Disruption Instability Mitigation in the Supply Chain».

При интерпретации полученных результатов должен быть учтен ряд **ограничений диссертационного исследования**, основными из которых являются:

1. Основные последовательные события в модели, связанные с негативным воздействием сбоя в цепи поставок, распределены по времени. В случае с продукцией с ограниченным сроком годности после устранения прямого воздействия сбоя наблюдается рост запасов. Увеличение уровня запасов приводит к повышенным рискам списания. По этим причинам стабилизация системы занимает несколько периодов. При анализе работы имитационной модели возможно ретроспективно отследить, размещение каких заказов в период восстановления цепи поставок привело к списанию продукции из-за истекшего срока годности. В реальной жизни подобный анализ может быть применен ограниченно;
2. Анализ производительности системы во время сбоя и в период восстановления не позволяет в полной мере спрогнозировать будущую динамику, например, ожидаемые риски списания продукции. Дополнительные исследования требуются для изучения многопродуктовых и многоэшелонных цепей поставок. Более

эффективные алгоритмы планирования поставок, а также другие виды сбоев в работе цепи поставок – это также важные направления исследований;

3. Рассмотрены цепи поставок с использованием одинаковых типов снабжения каждым звеном сети. Анализ динамики при совместном применении нескольких типов снабжения (хранение, кросс-докинг) и различных вариантов централизации принятия решения об изменениях в применяемых алгоритмах управления запасами – это перспективные направления для дальнейшего изучения.

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Определены характеристики процесса восстановления цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности, влияющие на её производительность.

Изучение периода восстановления цепи поставок после окончания непосредственного влияния негативного рискового события (например, восстановление мощности производства до уровня 100% после снижения на 50%) позволило сформулировать следующие положения:

1. Без скоординированных действий после окончания сбоя в цепи поставок генерируются повышенные затраты на содержание запасов как следствие поставки продукции, которая не была отгружена в срок ранее в период сбоя.

Данный эффект можно обозначить как «отложенная избыточность». При этом последствием сбоя являются дефицит продукции и риски списания одновременно. Цепи поставок с продолжительным циклом между размещением заказа и поставкой в большей степени подвержены негативному воздействию сбоев в цепи поставок (рисунок 2).

2. Недостаточно скоординированное поведение звеньев цепи в период сбоя приводит к избыточным заказам как «панической» реакции.

Требуются координирующие алгоритмы для мониторинга поведения цепи поставок, идентификации сбоев и корректировки правил размещения заказов (рисунок 3).

3. Отмена размещенных в период сбоя заказов сразу после окончания действия рискового события позволяет избежать избыточных запасов и рисков списания.

При использовании координированной политики уровень запаса в период восстановления не превышает уровень в период работы в обычном режиме.

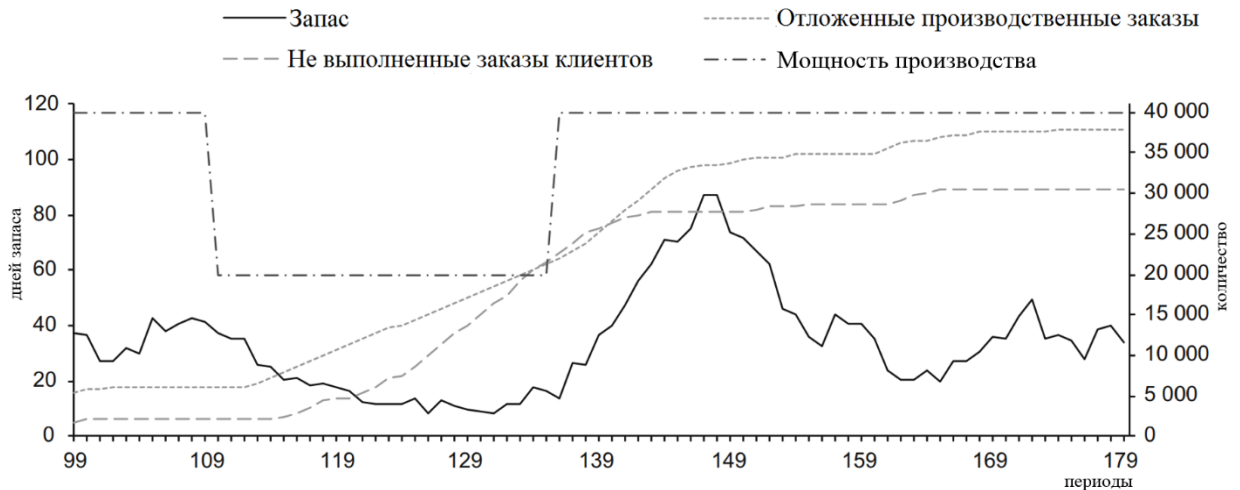


Рисунок 2 – Эффект от отсутствия координации после окончания действия негативного рисковог о события⁴⁸

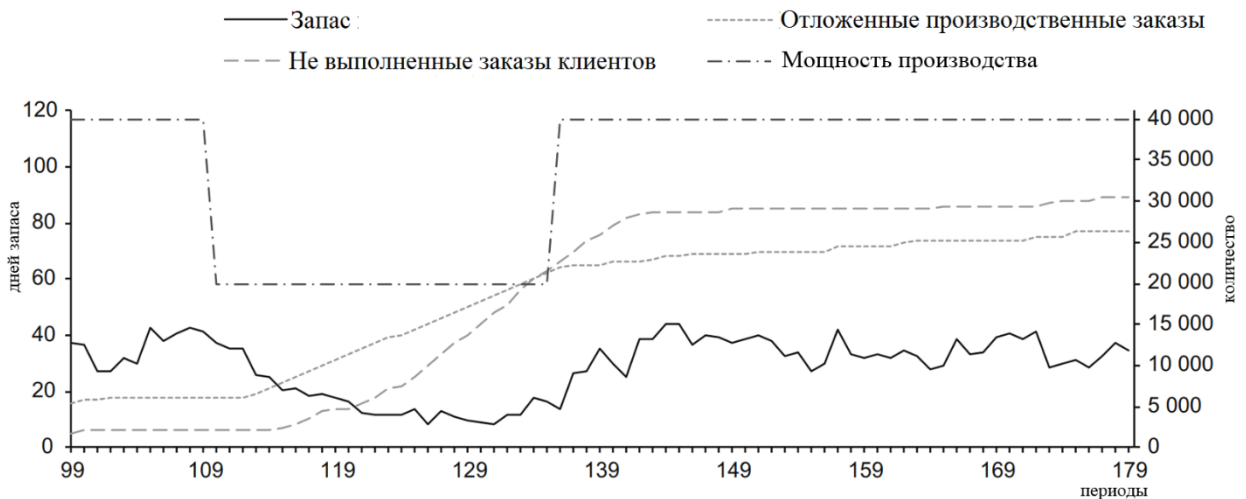


Рисунок 3 – Эффект от координации после окончания действия негативного рисковог о события⁴⁸

4. После возврата к нормальному режиму работы средний уровень запаса и динамика отмененных заказов могут быть использованы в качестве индикаторов восстановления цепи поставок.

Не выполненные в срок заказы – это один из индикаторов инерции цепи поставок. В данном случае под инерцией подразумевается продолжительность цикла обратной связи в цепи поставок. Если количество таких заказов увеличивается, несмотря на стабилизировавшийся показатель уровня сервиса, это свидетельствует о скором значительном росте запасов в объеме данных дополнительно размещенных заказов.

⁴⁸ Источник: Rozhkov, M. Coordination of production and ordering policies under capacity disruption and product write-off risk: an analytical study with real-data based simulations of a fast moving consumer goods company / D. Ivanov, M. Rozhkov // Annals of Operations Research. – 2020. – N 291. – P. 387–407.

Следующее обобщение полученных результатов может быть сделано на основе анализа экспериментов:

1. Цепи поставок с длительными циклами между размещением заказов и поставкой оказываются более подвержены негативным последствиям сбоев;
2. Отмена не выполненных в срок заказов (и информирование об окончании воздействия рискового события) приводит к снижению уровня запаса и рисков списания продукции при сохранении уровня сервиса;
3. Если количество не выполненных в срок заказов растет, несмотря на стабилизацию уровня сервиса, это говорит о предполагаемом резком росте уровня запасов;
4. Чем выше частота размещения заказов и ниже минимальный размер заказа (в границах, определенных экспериментами), тем выше гибкость цепи поставок. При этом фактический размер заказа определяется как кратный минимальному размеру заказа.

Средний уровень запаса в цепи поставок не может использоваться как единственный индикатор функционирования цепи поставок во время сбоя. Но, в сочетании с динамикой отмененных заказов, может использоваться на этапе восстановления цепи поставок. Не выполненные в срок заказы – один из индикаторов инерции системы. Если наблюдается рост данного показателя, то возможен значительный рост уровня запасов.

2. Волновой эффект и эффект хлыста в цепях поставок взаимосвязаны, данная взаимосвязь может быть количественно оценена.

Недостаточная координация в цепи поставок в период сбоя вызывает эффект хлыста при распространении последствий рискового события вперед по цепи поставок (в сторону конечного потребителя). В период сбоя размещение избыточных заказов может рассматриваться как «паническая» реакция. В период сбоя меняется функционирование цепи поставок, что приводит к невыполненным заказам, изменениям в производстве, размещении заказов и политиках управления запасами. Эти изменения могут сохраняться и в течение некоторого временного интервала после окончания действия рискового события. По этой причине важна разработка специфических политик для восстановления и стабилизации цепи поставок при переходе из одного состояния в другое.

Координация цепи поставок в периоды сбоя позволяет избежать появления эффекта хлыста при распространении волнового эффекта от произошедшего сбоя в работе (рисунок 4, рисунок 5). Данные меры позволяют стабилизировать уровень запасов, снизить количество недопоставок. Корректировка (адаптация) может быть выполнена двумя

способами. Первый способ – это отмена не выполненных в срок заказов в период восстановления нормального режима работы. Второй – это приостановка размещения новых заказов, даже если уровень запасов ниже заданного уровня во время действия рискованного события.

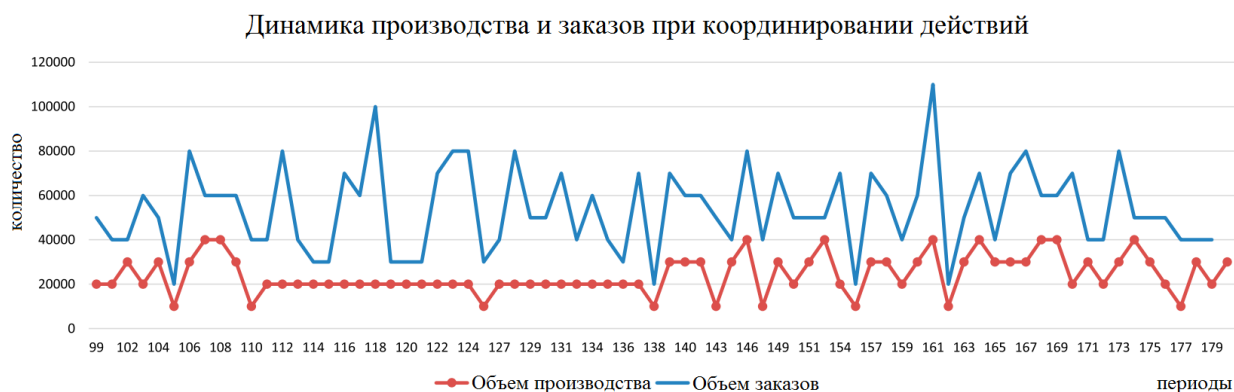


Рисунок 4 – Динамика производства и заказов при координировании действий⁴⁹

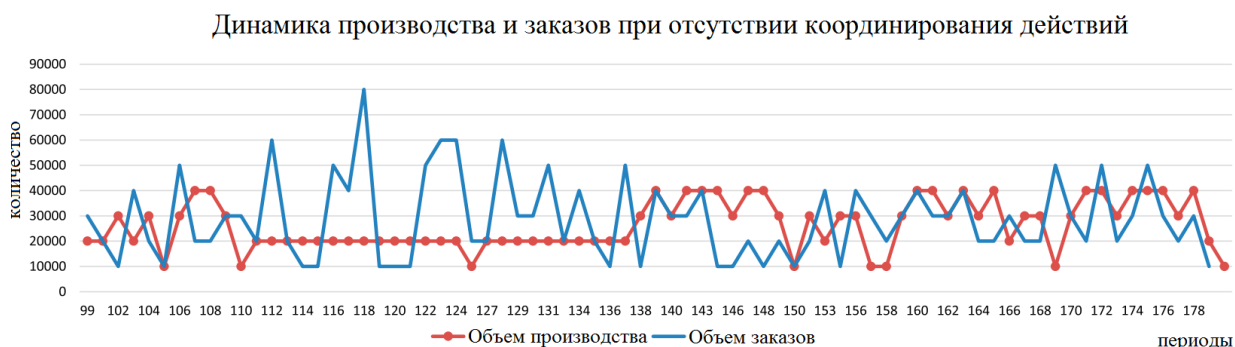


Рисунок 5 – Динамика производства и заказов при отсутствии координирования действий⁴⁹

Предложена формула для оценки того, как волновой эффект может послужить драйвером эффекта хлыста. Данная формула основана на подходе для численной оценки эффекта хлыста⁵⁰. Оценка вариации заказов (*OrderVarR*) может быть рассчитана следующим образом (1):

$$OrderVarR = \frac{\sigma_{order}^2 / \mu_{order}}{\sigma_{demand}^2 / \mu_{demand}} \quad (1)$$

⁴⁹ Источник: Rozhkov, M. Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain / A. Dolgui, D. Ivanov, M. Rozhkov // International Journal of Production Research. – 2020. – Vol.58. – N 5. – P. 1285–1301.

⁵⁰ Disney, S.M. On the Bullwhip and Inventory Variance Produced by an Ordering Policy / S.M. Disney, D.R. Towill // Omega. – 2003. – Vol. 31. N 3. – P. 157–167.

В данной формуле μ с соответствующим индексом обозначает среднее значение для величины спроса или среднего размера заказа. Величина стандартного отклонения обозначена символом σ . Очевидно, если соотношение больше единицы, то проявляется эффект хлыста. Если соотношение равно единице, то усиления эффекта хлыста нет. В случае уровня менее единицы эффект хлыста затухает.

Одна из основных характеристик волнового эффекта это изменение уровня производительности звеньев цепей поставок, увеличение вариации поставок увеличивает неопределенность при планировании в цепи поставок. Поэтому подход, основанный на оценке вариации поставок и спроса может быть использован для оценки волнового эффекта, с учетом вариации поставок (2):

$$SupplyVarR = \frac{\sigma_{supply}^2 / \mu_{supply}}{\sigma_{demand}^2 / \mu_{demand}} \quad (2)$$

Существенным отличием волнового эффекта от эффекта хлыста является то, что динамика волнового эффекта при распространении по эшелонам цепи поставок не всегда является нарастающей. Взаимосвязь заказов и поставок позволяет оценить эффективность работы цепи поставок и таким образом количественно оценить влияние волнового эффекта⁵¹. Более того, оценка выполнения заказов объективно характеризует распространение сбоя или же волновой эффект. Взаимосвязь между вариацией поставок и заказов представлена следующей формулой, которая позволяет оценить, в какой степени волновой эффект и эффект хлыста взаимно влияют друг на друга (3).

$$Index_{BWE}^{RE} = \frac{SupplyVarR}{OrderVarR + SupplyVarR} \quad (3)$$

Если $Index_{BWE}^{RE}$ находится в диапазоне $\{0, 1\}$, то тогда есть влияние волнового эффекта на эффект хлыста. Чем ближе величина $Index_{BWE}^{RE}$ к единице, тем пропорционально выше влияние волнового эффекта на эффект хлыста. Если $Index_{BWE}^{RE} = 0$, то нет влияния волнового эффекта на эффект хлыста.

Впервые показано, что волновой эффект может быть драйвером эффекта хлыста, а также то, что эффект хлыста может быть запущен значительным сбоем, даже несмотря на то, что распространение последствий сбоя по цепи поставок происходит в обратном направлении. Таким образом, этот риск должен приниматься во внимание как во время

⁵¹ Ivanov, D. Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management / D. Ivanov; – New York: Springer, 2018. – 320 p.

действия негативного события, так и вскоре после его окончания. Структурная динамика цепей поставок влияет на политики управления запасами, управления производством, размещения заказов.

Генерация избыточных заказов в период сбоя в работе цепи поставок возможна, если производство не информирует о случившемся сбое и ограничениях по мощности. По этой причине каждый период в системе появляются новые заказы. За счет этих заказов работающее не в полную мощность из-за сбоя производство перегружается еще сильнее.

После окончания сбоя вышедшее на базовую мощность производство отгружает эти избыточные заказы, что приводит к резкому увеличению уровня запаса у звеньев сети распределения после производства. После этого частота размещения заказов меняется еще раз. Высокий уровень запасов приводит к списанию продукции и поэтому количество заказов снижается. Недопоставки продукции клиентам могут приводить к дополнительным штрафам. Таким образом сбой в работе производства может послужить причиной возникновения эффекта хлыста. Данное утверждение справедливо также и для продукции без ограничений по сроку годности.

3. Определена зависимость распространения волнового эффекта от используемой политики отгрузки запаса при различных конфигурациях логистической сети.

Для анализа влияния данного типа было смоделировано несколько вариантов политик отгрузки и обработки продукции, а также несколько конфигураций логистической сети. Каждая конфигурация подразумевала различный набор действий в случае сбоя в работе цепи поставок.

Эксперименты с имитационной моделью позволили оценить влияние различных политик отгрузки при отличающихся конфигурациях цепи поставок на разных уровнях:

1. Уровень логистической сети: две параллельные сети с одинаковыми взаимозаменяемыми продуктами;
2. Процессный уровень: два варианта обработки запасов в распределительном центре (хранение и кросс-докинг);
3. Процессный уровень (продукт): ограниченный срок годности, разные политики отгрузки запасов в распределительных центрах;
4. Оперативный уровень: замена источника поставок.

Влияние политики отгрузки запаса более выражено на начальной стадии сбоя в цепи поставок. В период восстановления функционирования цепи поставок политика отгрузки оказывает меньшее воздействие (рисунок 6).

Динамика уровня запаса (средний уровень запаса) при координировани действий

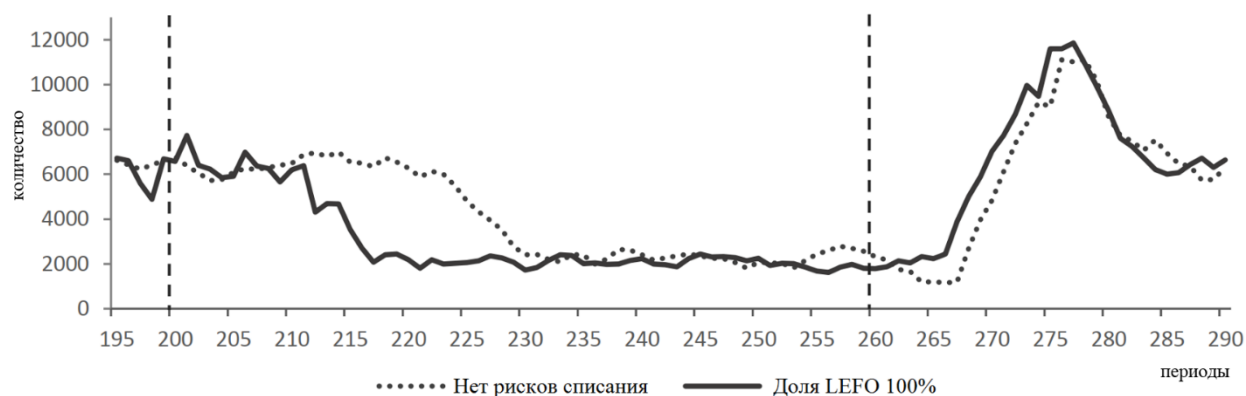


Рисунок 6 – Динамика уровня запасов при различных ограничениях по остаточному сроку годности продукции⁵²

Цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности более эффективно справляются с воздействием рисковог события при наличии альтернативного источника поставок (Таблица 1). Возможность быстрого переключения источника снабжения возможна при достаточно развитой логистической сети или при наличии параллельного контура (например, в случае нескольких логистических сетей группы компаний под единым управлением). При этом при частичной потере мощности цепи поставок срок переключения на альтернативный источник снабжения не является наиболее критичным.

⁵² Rozhkov, M. Supply chain ripple effect: impact of disruption profile and priority scheduling rules for perishable inventory / M. Rozhkov // International Journal of Integrated Supply Management. – 2022. – Vol.15. – N 2. – P. 184–205.

Таблица 1 – Влияние срока переключения источника снабжения на производительность цепи поставок⁵³

Конфигурация	Интервал переключения на альтернативный источник снабжения, периодов	Общие затраты, у.е.	Общий затраты на недопоставки, у.е.	Затраты на списание, у.е.	Уровень сервиса, %
Хранение запаса ФРЦ	0	192 808 360	—	1 111 792	100%
Хранение запаса ФРЦ	10	192 698 154	2 000	859 971	99.90%
Хранение запаса ФРЦ	20	192 989 102	36 000	883 635	99.80%
Кросс-докинг ФРЦ	0	208 593 908	3 000	6 165 150	99.90%
Кросс-докинг ФРЦ	10	209 400 811	33 000	6 350 767	99.90%
Кросс-докинг ФРЦ	20	210 628 878	184 000	6 510 463	99.20%

⁵³ Источник: Rozhkov, M. Supply chain ripple effect: impact of disruption profile and priority scheduling rules for perishable inventory / M. Rozhkov // International Journal of Integrated Supply Management. – 2022. – Vol.15. – N 2. – P. 184–205.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В диссертационном исследовании проанализирована устойчивость цепей поставок продукции с ограниченным сроком годности. Данные цепи поставок характеризуются тем, что не все базовые подходы к повышению их устойчивости являются применимыми. Дополнительная размерность запасов в виде остаточного срока годности значительно усложняет процесс планирования поставок продукции, а также увеличивает восприимчивость цепи поставок к внешним негативным рисковым событиям в целом. В условиях воздействия сбоя на работу цепи поставок продукции с ограниченным сроком годности влияние вызванных им динамических эффектов может дестабилизировать систему и одновременно повысить как риски списания продукции, так и риски возникновения дефицита.

Рассмотрен один из эффектов, связанных с динамическими характеристиками устойчивости: волновой эффект. В качестве инструмента исследования использовалась гибридная имитационная модель, сочетающая элементы дискретно-событийного и мультиагентного подходов моделирования. Данный метод эффективно применяется для решения задач исследования, так как позволяет управлять степенью детализации описываемых систем, включает возможности дополнительной оптимизации, а также предоставляет возможность интегрировать в модель алгоритм планирования поставок. Таким образом, одновременно рассматриваются как задачи управления запасами, так и задачи повышения устойчивости цепей поставок.

В настоящем исследовании сформулировано понятие и представлен механизм возникновения одной из составляющих волнового эффекта: «отложенной избыточности». Проанализированы метрики, позволяющие отслеживать возникновение данного явления. Показано, что негативные последствия «отложенной избыточности» могут быть скорректированы за счет дополнительных управляющих воздействий, согласования действий между звеньями цепи поставок на этапе восстановления после окончания воздействия сбоя.

Впервые рассмотрено взаимное влияние двух динамических эффектов в цепях поставок: волнового эффекта и эффекта хлыста. Несмотря на то, что они имеют отличающиеся причины возникновения и часто распространяются по цепи поставок в противоположных направлениях, существуют сценарии, в которых их воздействие будет взаимно усилено. Предложена метрика для численной оценки динамики распространения данных эффектов в цепи поставок в совокупности.

Дополнительно рассмотрены особенности функционирования цепей поставок с различными конфигурациями логистической сети, политиками обработки запасов и политиками отгрузок запасов. Впервые сопоставлено влияние базовых политик отгрузки запаса на процесс распространения последствий сбоя в цепи поставок. Таким образом, рассмотрены параметры повышения устойчивости цепи поставок на трех основных уровнях: контроль процессов, оперативный контроль и структура логистической сети.

4. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные результаты диссертационного исследования представлены в трех статьях, опубликованных в международных рецензируемых журналах, индексируемых в междисциплинарных базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus.

1. Rozhkov, M. Coordination of production and ordering policies under capacity disruption and product write-off risk: an analytical study with real-data based simulations of a fast moving consumer goods company [Координация производства и политик размещения заказов при сбоях, влияющих на мощность и рисках списания: аналитическое исследование с имитационным моделированием на основе реальных данных компании сектора FMCG] / D. Ivanov, M. Rozhkov // *Annals of Operations Research*. – 2020. – N 291. – P. 387–407 (Scopus Q1 Management Science and Operations Research⁵⁴, WoS Q1 Operations research & management science⁵⁵).

Автор диссертационного исследования отвечал за эмпирическую часть статьи, включая подготовку данных, разработку и описание имитационной модели, а также проведение экспериментов. Также автор участвовал в отборе и анализе релевантной исследованию литературы. Полученные результаты легли в основу решения первой, второй и третьей задачи диссертационного исследования.

2. Rozhkov, M. Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain [Влияет ли волновой эффект на эффект хлыста? Интегрированный анализ структурной и операционной динамики цепи поставок] / A. Dolgui, D. Ivanov, M. Rozhkov // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol.58. – N 5. – P. 1285–1301 (Scopus Q1 Management Science and Operations Research⁵⁶, WoS Q1 Operations research & management science⁵⁷).

Автор диссертационного исследования отвечал за эмпирическую часть статьи, включая подготовку данных, разработку и описание имитационной модели, а также проведение экспериментов. Также автор участвовал в отборе и анализе релевантной

⁵⁴ URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=23090&tip=sid&clean=0> (дата обращения: 25.04.2022).

⁵⁵ URL: <https://jcr.clarivate.com/jcr-jp/journal-profile?journal=ANN%20OPER%20RES&year=2020&fromPage=%2Fjcr%2Fbrowse-journals> (дата обращения: 25.04.2022).

⁵⁶ URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=27656&tip=sid&clean=0> (дата обращения: 25.04.2022).

⁵⁷ URL: <https://jcr.clarivate.com/jcr-jp/journal-profile?journal=INT%20J%20PROD%20RES&year=2020&fromPage=%2Fjcr%2Fbrowse-journals> (дата обращения: 25.04.2022).

исследованию литературы. Полученные результаты легли в основу решения первой, второй и четвертой задачи диссертационного исследования.

3. Rozhkov, M. Supply chain ripple effect: impact of disruption profile and priority scheduling rules for perishable inventory [Волновой эффект в цепях поставок: влияние профиля сбоев и политик отгрузки для запасов продукции с ограниченным сроком годности] / M. Rozhkov // *International Journal of Integrated Supply Management*. – 2022. – Vol.15. – N 2. – P. 184–205 (Scopus Q3 Strategy and Management⁵⁸).

Автор диссертационного исследования является единственным автором статьи и несет полную ответственность за все выводы, представленные в данной работе. Полученные результаты легли в основу решения первой, второй и пятой задачи диссертационного исследования.

Кроме того, результаты диссертационного исследования нашли отражение в следующих публикациях:

1. Rozhkov, M. Adapting supply chain operations in anticipation of and during the COVID-19 pandemic / M. Rozhkov, D. Ivanov, J. Blackhurst, A. Nair // *Omega*. – 2022. – Vol.110. – N 9(102635). – P. 2–49 (Scopus Q1 Management Science and Operations Research⁵⁹, WoS Q1 Operations Research & Management Science⁶⁰).

2. Rozhkov, M. Contingency production-inventory control policy for capacity disruptions in the retail supply chain with perishable products [Политика управления запасами и производством при сбое в работе цепи поставок розничной сети для продукции с ограниченным сроком годности] / M. Rozhkov, D. Ivanov // *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM*. – 2018. – Vol. 51. – N 11. – P. 1448–1452.

3. Rozhkov, M. Disruption Tails and Post-Disruption Instability Mitigation in the Supply Chain [Отложенная избыточность и снижение нестабильности после сбоев в цепях поставок] / M. Rozhkov, D. Ivanov // *9th IFAC (International Federation of Automatic Control) Conference MIM 2019 on Manufacturing Modeling, Management, and Control*. – 2019. – Vol. 52. – N 13. – P. 343–348.

4. Rozhkov, M. Disruption Tails and Revival Policies in the Supply Chain [Последствия сбоев и восстановительные политики в цепях поставок] / M. Rozhkov, D. Ivanov // *Handbook*

⁵⁸ URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=3900148211&tip=sid&clean=0> (дата обращения: 25.04.2022).

⁵⁹ URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21915&tip=sid&clean=0> (дата обращения: 25.04.2022).

⁶⁰ URL: <https://jcr.clarivate.com/jcr-jp/journal-profile?journal=OMEGA-INT%20J%20MANAGE%20S&year=2020&fromPage=%2Fjcr%2Fhome> (дата обращения: 25.04.2022).

of Ripple Effects in the Supply Chain. International Series in Operations Research & Management Science. – 2019. – Vol. 276. – P. 229–260.