

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ СИСТЕМИ В ЛОГІСТИЦІ: ОГЛЯД ВИКОРИСТАННЯ ТА ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ

Проаналізовано напрямки застосування та використання децентралізованих (розподілених) систем на прикладі технології блокчейн в міжнародній логістиці. Розглянуто перспективи та ключові аспекти подальшого розвитку децентралізованих систем та великих баз даних. Розглянуто основи функціонування смарт-контрактів на базі Ethereum та мови Solidity. Проаналізовано основні проблеми безпеки в цілісному ланцюгу постачання, виявлено напрямки покращення відслідковування безперервності контролю якості товару під час руху в мультимодальному ланцюгу постачання. Запропоновано методи посилення контролю за безпекою в децентралізованих системах у логістиці. Розглянуто методологію формальних алгебраїчних методів з метою аналізу та дослідження властивостей перевезень при взаємодії агентів певного логістичного середовища.

Ключові слова: децентралізована система, блокчейн, смарт-контракт, логістика, Solidity.

1. Загальна інформація

У зв'язку із зростаючими обсягами промислового виробництва, ростом населення, глобалізацією та міжнародною торгівлею, у світі зростає роль міжнародної логістики та все більше уваги приділяється до зростання її ефективності та вирішення проблем.

ІТ сектор також не міг лишитись у стороні від глобальних трендів, тенденцій та широко залучається до міжнародної логістики. Одна з таких прогресивних ІТ технологій, що набула популярності протягом останнього десятиліття – це технологія блокчейн [1, 2], що характеризується принципом децентралізації. Блокчейн технологія є технологією загального, надзвичайно широкого призначення [3] та може застосовуватись в будь-якій галузі промисловості. Згідно визначенню автора цієї технології Сатоші Накамото, це «розподілена база даних з записами або публічний реєстр всіх транзакцій або цифрових подій, що були виконані та поширені серед всіх учасників» [1]. Система надійна та захищена – записи перевіряються публічними реєстрами та ніколи не можуть бути видаленими в майбутньому, тобто зберігаються завжди. Головні переваги технології блокчейн – це прозорість та висока ефективність [4].

Нині контроль за товарооборотом та документообігом здійснюється через багатьох посередників, які збирають значну комісію за свою діяльність, а також ви-

трачають деякий час та ресурси на здійснення цієї діяльності. Технологія блокчейн дає змогу всім зацікавленим сторонам робити транзакції та здійснювати контроль безпосередньо один між одним, при чому це здійснюється дуже швидко та безпечно. Іншою перевагою технології блокчейн є можливість виконувати «смарт контракти» («smart contracts»). «Смарт контракти» – комп'ютерні програми, які створені для автоматичного виконання контрактів чи обміну інформацією [1].

В мультимодальних перевезеннях у міжнародній логістиці використання технології блокчейн у розрізі швидкості та надійності контролю, та обміну інформацією виглядає особливо перспективно, так як там задіяно безліч учасників з різними функціями в різних країнах світу (виробник товару, склад, експортер, митниця та контролюючі органи держави, власники засобів перевезень, портові оператори, оператори перевантаження, імпортери, продавці та покупці, проміжні власники товарів). Тому оперативний контроль та реагування має особливе значення.

Технологія блокчейн викликала інтерес та швидко розвивається в багатьох галузях: енергетика, охорона здоров'я, фінанси, державний контроль та інше. Не виключенням є і міжнародна логістика, проте, на жаль вивчення можливостей застосування технології блокчейн в міжнародній логістиці не є достатнім [5]. Проте,

без сумнівів, міжнародна логістика – одна із галузей, в якій технологія блокчейн має надзвичайні перспективи застосування, тому кількість наукових досліджень буде зростати.

Проте ряд скандинавських країн вже виявило зацікавлення та використовують блокчейн у своїй діяльності. Це пов'язано з тим, що вони в силу обставин вимушені використовувати в основному міжнародні морські перевезення. Ряд значних міжнародних морських операторів вже почали використовувати технологію блокчейн та вивчають можливості більш широкого використання [6].

Також міжнародне судноходство – це галузь, яка жорстко регулюється Міжнародною Судноходною Організацією (International Maritime Organization – IMO) та законодавством Євросоюзу [7]. Законодавство стає щороку все суворішим, вимоги все вищими, тому ведучі морські перевізники виявили зацікавленість в подальшому розвитку технології блокчейн для оптимізації своїх бізнес-процесів.

Згідно з дослідженням міжнародної сертифікаційної та класифікаційної спільноти DNV GL один незапланований простій під завантаження-вивантаження чи запізнення може коштувати логістичному оператору \$2–5 млн. в день. Приблизно 50 % трапляються через різноманітні механічні поломки. Але недостатній менеджмент інформації призводить до прихованих втрат, який може вимірюватись у розмірі до 20 % операційного бюджету [8]. Тому вони заявляють про своє бажання вивчати та розробляти технологію великих масивів інформації у розподілених системах з подальшим її застосуванням в автоматизованій системі менеджменту ризиків використання активів. Вони називають свою технологію «cloud-based digital twin» (цифрові двійники в хмаровому сховищі).

На сьогоднішній день потік інформації типової системи постачання складає близько 100 гігабайт в день [9], за оцінками експертів цей потік інформації зросте до 35 зетабайт до 2020 [10].

Доктор Мартін Стопфорд, один з передових світових експертів та аналітиків в економіці та морських перевезеннях, зая-

вляє, що «діджиталізація» (перехід в цифровий світ) є єдиним та невідворотним виходом для галузі морських перевезень. Аналізуючи економічні цикли, розвиток судобудівництва та перевезень з початку 20 століття, він заявляє, що три методи здатні змінити бізнес-модель циклів перевезень за допомогою діджиталізації, яка так необхідна галузі: «розумні» кораблі, «розумний» флот (з інтегрованою системою відслідковування та контролю торгового флоту як єдиної цілісної системи) та «розумна» глобальна логістика (з інтегрованою системою постачання «від-дверей-до-дверей»). Він додає, що великі культурні зміни повинні передувати таким змінам та для подальшого застосування додатків за технологією блокчейн у морській логістиці. Середнє комерційне судно має близько 2000 різних датчиків та сенсорів, але вони використовуються в малій мірі, в основному людьми, а повинні контролюватись автоматизованою системою. Така система передбачалась ще в 70–80 роки, але лише нині системи GPS-навігації та блокчейн технології дозволяють втілити їх в життя. Він заявляє, що «мати технологію – це перший крок, проте масиви інформації повинні використовуватись заради того, щоб показати зростання показників продуктивності та ефективності галузі» [11].

На сьогодні практично кожне вантажне судно, що здійснює міжнародні перевезення, оснащене системою ідентифікації за радіочастотами (Radio Frequency Identification – RFID). Ця система інтегрована з «інтернетом речей», початково для відслідковування місцезнаходження судна, а потім послужила для більш широкого застосування, та нині є основою для передових технологій на основі технології блокчейн [12]. Радіочастотне розпізнавання здійснюється за допомогою закріплених за об'єктом спеціальних міток, що несуть ідентифікаційну та іншу інформацію. Цей метод вже став основою побудови сучасних безконтактних інформаційних систем, і має стійку назву RFID-технології. Використання RFID-міток, за прогнозами, зросте до 209 мільярдів одиниць до 2021 року [13], а технології, що використовують такі мітки, дадуть змогу знизити операційні

витрати на 10–25 % [14]. Проте, найбільш вживаною технологією для Інтернету речей є GPS-навігація, що дозволяє з найбільшою точністю слідкувати за місцеперебуванням об'єктів [15].

У березні 2017 року Норвезький Університет Науки та Технологій разом з комерційними партнерами Kongsberg Seatex, Marintek, Maritime Robotics та Rolls-Royce Marine у водах фьорду Трондхейм розпочали пілотний проект з запуску першого в світі автоматизованого самокерованого судна без жодної людини на борту, супроводжувати який будуть повітряні та підводні дрони.

Ще одним прикладом є портові оператори. Морські перевізники та інші логістичні оператори жорстко конкурують за місце в порту та портовому складі, створюючи при цьому величезні черги, але зібрана інформація не поширюється між пірсами навіть одного порту. Тому системі надзвичайно важко проаналізувати та розподілити інформацію від порту до зацікавлених сторін з метою оптимізації використання доступного ресурсу обслуговуючої логістики. Таким чином порти стають «вузьким місцем» логістичних операцій, а обсяг таких операцій щодня зростає. Порт Гамбург оцінює, що число обороту контейнерів, що проходять через порт, зростає до 25 мільйонів у рік до 2015 року, тому обробка такого величезного обсягу потребує залучення нових технологій обробки великих масивів інформації, швидкого та надійного розподілу інформації між зацікавленими сторонами, що, без сумніву, під силу блокчейн-системам [15].

Ще один інноваційний проект в міжнародній логістиці розпочав Морський та портовий департамент порту Сінгапур під назвою Smart Port Challenge. Вони співпрацюють з портом Роттердам, який розпочав подібну ініціативу (проект Onboard). Вони залучають Інтернет речей до індустрії морських перевезень, пропонуючи відкрити платформу з повністю інтегрованим програмним забезпеченням для спостереження в реальному часі за рухом суден та портовими операціями [16].

Більшість сучасних новітніх розробок фокусується на аналізі великих баз

даних та на штучному інтелекті з метою зниження споживання палива та інших ресурсів, зниження викидів CO₂ в атмосферу, оптимізації маршрутів, скорочення затрат часу та праці, інтеграцію з іншими популярними технологіями, такими як дрони та проектування вищезгаданих кораблів без людей на борту.

Проте бази даних, аналітичне програмне забезпечення, додатки, що базуються на Інтернеті речей потребують діяльності посередників у ланцюгу доступу, що додає лишніх кроків, затрат ресурсів та коштів. Помітно, що в галузі зростає увага до подальших інновацій та технологій. Разом з тим технологія блокчейн може бути тим рішенням, яке задовольнить зростаючі потреби міжнародної логістики, такі як децентралізація, кодування, безпечність, доступність, швидкодія.

2. Огляд використання блокчейн-рішень у логістиці

Велика фрахтова форвардна компанія Marine Transport International Limited (MTI) заявила, що з середини 2016 року використовує систему блокчейн відкритого типу під назвою TrustMeTM для контролю за відповідністю ваги бруто завантажених контейнерів, що надходять на завантаження, новим нормам постанов Міжнародної Морської Організації «SOLAS», які вступили в дію з липня 2016 року. Нове законодавство перекладає на відправника відповідальність за порушення норм гранично допустимої ваги бруто до етапу, коли контейнер поступає на завантаження на судно. Компанія почала використовувати технологію блокчейн TrustMeTM через необхідність надання бесперебійних та реальних актів перевірок портовим державним органам, перевізникам та власникам вантажу, таким чином уникаючи посередників при передачі інформації, приватних баз даних, логів та паперової роботи [5].

DNV GL – міжнародна сертифікаційна та класифікаційна спільнота, ключова компетентність якої є оцінка, консалтинг та менеджмент ризику в морській логістиці. DNV GL – найбільша класифікаційна спільнота, в реєстрі якої знахо-

диться 13175 суден та мобільних морських судоходних установок, сумарна водотоннажність 265.4 млн. т., що являє собою 21 % світового ринку [17].

DNV GL помістила всі свої 90 000 сертифікатів у системи менеджменту та ланцюгів постачання в закриту систему блокчейн, став першою, хто це зробив в галузі сертифікації морської логістики. Кожен сертифікат має цифрову ідентифікацію, відслідковуваність та зберігається в приватній системі блокчейн. Технологія запобігає фальсифікації сертифікатів та дає можливість компанії повідомлювати про свої сертифікати прозорим та безпечним способом. Серед головних переваг користування технологією блокчейн компанія зазначає «аутентичність (підтвердження істинності), децентралізацію та кодування». Також з вересня 2017 року компанія оснащує всі випущені та перевипущені сертифікати QR-кодами, а бажаючий за допомогою мобільного телефону може перевірити його достовірність, відсканувавши код, а система перевірить сертифікат у мережі блокчейн [18].

Також компанія DNV GL розробляє проект «Blockchains in the shipping world» (блокчейн у світі поставок), який включає наступні модулі: складування, відвантаження, митниця, страхування, оплата [19].

DNV GL пояснюють функцію кожного модуля наступним чином:

Модуль «Складування»: кожна одиниця товару чи відвантаження, кожна одиниця інвентарю чи документ може бути відслідкований покроково. Причини втрат чи псування можуть бути ідентифіковані. Документообіг, затримки та людські помилки вражаюче знижуються. Особливий ефект дає в поєднанні з Інтернетом речей.

Модуль «Відвантаження»: особлива увага в системі менеджменту ланцюгів поставок приділяється спрощенню, зниженню документообороту та уникненню шахрайству. Відвантажуюча сторона зберігає повний контроль, інші зацікавлені сторони мають доступ лише до даних, які потрібні для їх роботи. Це значно знижує величезний обсяг супутнього документоо-

бороту та вартість транзакцій з залученням багатьох учасників. В ідеалі кожна зацікавлена сторона (судновласник, уряд, регулятивні органи, агенства) нададуть свою ноду, де відповідний блок з належною інформацією буде дублюватись. Перші випробування разом з Maersk та IBM в лютому 2017 року показали високу ефективність.

Модуль «Митниця»: митні органи повинні впевнитись в цілісності та захищеності імпорتنих та експортних операцій. Технологія блокчейн здатна надзвичайно сильно скоротити час та зусилля моніторингу та відслідковування відвантажень. Оформлені митні декларації, інтегровані з системою блокчейн, видимі всім зацікавленим сторонам миттєво. Імпортери матимуть достовірну інформацію про відвантаження, товар, країну походження, місце, час замитнення та всі відповідні фінансові операції. Всі відомі методи шахрайства відсікаються. Значно покращується взаємодія між державними органами, учасниками бондових, ф'ючерсних та акредитивних договорів.

Модуль «Страхування»: за рахунок миттєвої доступності та видимості всім відповідним зацікавленим сторонам значно знижуються ризики та час, необхідний на перевірку інформації. Особливо важливим є відслідковування виконання та часу виконання бізнес-процесів, які є умовою здійснення певних наступних дій. Вже випробувано разом з Maersk та Microsoft та показало вражаючі результати.

Модуль «Оплата». Міжнародні банківські транзакції у міжнародній логістиці отримують значні переваги у вигляді прискорення платіжного процесу, перегляді балансів, дебету, кредиту, боргів та зобов'язань. Моментально відслідковуються дії контрагентів, угоди стають безпечними за допомогою залучення «смарт контрактів».

9 серпня 2018 року найбільша судоходна компанія на планеті Maersk та IT гігант IBM презентували [20] свою спільну розробку TradeLens [21] – комплексну платформу для контролю відвантажень та відслідковування суден та вантажів на базі технології блокчейн, побудовану на відк-

ритих стандартах. На момент анонсування 94 організації брали активну участь або тестували платформу TradeLens. Екосистема TradeLens включала: понад 20 портів та портових операторів, що включають в себе 234 морських коридори, трьох морських перевізники, митні органи Нідерландів, Саудівської Аравії, Сінгапуру, Австралії та Перу, великі логістичні та транспортні компанії. В загальному, морські перевізники, об'єднані в систему TradeLens, покривають 20 % долі глобального ринку ланцюгів постачання [22, 23].

В травні 2019 року перевізники MSC та CMA CGM заявили про своє бажання залучитись до мережі TradeLens. Таким чином незабаром TradeLens об'єднає трьох найбільших перевізників в світі: Maersk на першому місці, MSC на другому та CMA CGM на третьому [24, 25].

Система TradeLens базується на трьох компонентах: Екосистема, Платформа та Торговий майданчик [26].

Екосистема – це, власне, бізнес-мережа учасників: відправники, порти, термінали, митниця, морські та наземні перевізники.

Платформа доступна у вигляді програмного забезпечення та поєднує екосистему в єдине ціле за допомогою відкритих стандартів. Працює за допомогою так званого «Hyperledger Fabric blockchain» та IBM Cloud (хмарне рішення від IBM).

Торговий майданчик – відкриті дані та сервіси дозволяють TradeLens та третім сторонам публікувати пропозиції щодо сервісів поверх Платформи.

За основу TradeLens використовує технологію блокчейн від IBM для діджиталізації ланцюга постачання, дозволяючи торговим партнерам співпрацювати, установлюючи загальне широке бачення транзакції без приватності чи конфіденційності. Відправники, морські перевізники, портові оператори, порти та термінали, наземні транспортні компанії, митні органи можуть взаємодіяти більше ефективно через доступ в реальному часі до бази даних та відправних документів, а також до Інтернету речей та даних різноманітних сенсо-

рів широкої дії – від температурного контролю до ваги контейнера.

За допомогою блокчейн смарт-контрактів від IBM TradeLens дає можливість цифрової взаємодії багатьох сторін, що залучені до операцій міжнародної торгівлі. Модуль торгових документів, що був представлений у бета-режимі під назвою ClearWay дозволяє імпортерам/експортерам, митним брокерам та третім зацікавленим особам, таким як державні контролюючі органи, взаємодіяти в міжорганізаційних бізнес-процесах.

Протягом 12-місячного терміну випробування Maersk та IBM працювали з десятками екосистем партнерів для ідентифікації можливостей запобігти запізненням, спричинених помилками в документації, затримками у поданні інформації та інше. Один приклад продемонстрував як TradeLens зміг скоротити транзитний час поставки товару в США на 40 %, зекономивши тисячі доларів втрат. Інші приклади показали, що TradeLens змогла скоротити операційні проміжні дії, щоб відповісти на типові питання клієнта «де мій контейнер?» з десяти кроків та п'ять осіб до одного кроку та однієї особи.

Як альтернативу TradeLens та як його основний конкурент у кінці 2018 року створено подібний проект під назвою Global Shipping Business Network (GSBN) [27, 28], ще на початку процесу тестування включав дев'ять великих морських перевізників, випробування проводились на базі порту Роттердам, розробкою програмного забезпечення на основі технології блокчейн закритого типу займалась ІТ-компанія з Гонконгу CargoSmart, яка є структурним підрозділом OOCL, створеним спеціально для цієї цілі.

Функціонал та технологія GSBN схожі до TradeLens, проте в засобах масової інформації не розголошуються досить широко [29]. Зазначається, що CargoSmart залучить свій багаж знань по доменам вантажоперевезень, аналізатори великих баз даних та багаторічний досвід розробок програмного забезпечення з штучним інтелектом, Інтернетом речей та блокчейн технологіями для того, щоб допомогти

мережі учасників покращити свої логістичні операції.

Було заявлено, що на етапі тестування нового програмного забезпечення воно буде працювати з документооборотом та перевезеннями небезпечних вантажів з метою спрощення процесу обміну інформацією з регулятивними органами та прискорення процесу відвантажень.

Проте, як зазначалось раніше, в травні 2019 року CMA CGM заявила про своє бажання залишити проект Global Shipping Business Network та долучитись до проекту TradeLens. Вірогідною причиною є повільні темпи розробки та перенесення старту початку тестової роботи платформи (таблиця).

Ще одним інноваційним проектом є проект Xeneta від американського розробника Aberdeen Group [31]. Проект фокусується на відслідковуванні в реальному часі вартості морського фрахту заданого маршруту від різних перевізників, їх порівняння та обрання рекомендованого перевізника (комбінації перевізників з перевантаженням в портах транзиту) з критерієм вартості та/або часу. Хоч розробники і заявили про намір виносу бази даних у мережу блокчейн, проте на сьогодні дана технологія ще не використовується.

Технологія блокчейн також була застосована для створення системи єдиної торгівлі електроенергією між торговими біржами. Компанія Волт Маркетс, що є продавцем відновлюваної енергії, застосовував відкритий блокчейн для підтвердження надійності продаж та надав можливість

відслідковувати сертифікати відновлюваної енергії. В лютому 2017 інший торговий дім «Меркурія» застосували таку ж технологію в сферу торгівлі нафтою з банками ING та Société Générale banks [32].

Існує декілька інших можливих варіантів застосування технології блокчейн у міжнародній логістиці, в основному щодо питання вирішення регулювання документообігу та власності на товар. Блокчейн може вирішити питання діджиталізації бортових коносаментів, основного документу при міжнародних морських перевезеннях. Бортовий коносамент – це підтвердження прийняття на борт вантажу перевізником та підтвердження права власності. Отримання цього документу часто затягується через банківські процедури, що призводить до того, що корабель перевізника прибуває у порт призначення до моменту отримання покупцем бортового коносаменту.

Ізраїльський проект Wave сфокусований на створенні «безпаперової» торгівлі, з створенням усіх транспортних документів (бортовий коносамент, інвойс, сертифікат походження, сертифікат відповідності, банківський акредитив) в електронному виді та подальшому зберіганні за технологією блокчейн. Їх головним конкурентом є американська фірма Skuchain, що знаходиться в Каліфорнії.

Шведська компанія SkyCell створила спеціальний блокчейн – асоційований контейнер з температурним режимом для повітряних перевезень біофармацевтичних препаратів. Як відомо, даний тип продукції

Таблиця. Порівняння кількості учасників платформ TradeLens та Global Shipping Business Network станом на 22 квітня 2019 року [30]

TradeLens		Global Shipping Business Network	
Перевізник	Кількість контейнерів	Перевізник	Кількість контейнерів
Maersk	4,115,597	COSCO	2,822,551
PIL	405,870	CMA CGM	2,661,799
ZIM	305,247	Evergreen	1,248,375
Seaboard Marine	35,708	Yang Ming	673,354
Всього:	4,862,422		7,406,079

особливо чутливий до перепадів температур, тому контейнер здатен підтримувати температурний режим з відхиленням до 0,1 % від заданого, однак розміри такого контейнера дуже малі та підходять лише для перевезень специфічної продукції авіаційним транспортом [33].

Американська асоціація вантажних перевізників ВіТА створила на базі технології блокчейн мобільний додаток для пошуку клієнтів та вантажів, який покриває 85 % наземних вантажних перевезень в США та Канаді [34].

Microsoft також активно підключились до тенденцій використання блокчейн. В партнерстві з розробником програмного та апаратного забезпечення для відслідковування вантажів та транспорту Adents розробили платформу Adents NovaTrack, яка дозволяє побачити увесь шлях руху товарів та місцезнаходження протягом всього ланцюжка постачання. Початково платформа розроблялась з метою боротьби з підробками медичних препаратів та вакцин, але пізніше розробники розширили можливу сферу застосування технології [35].

Існують також ряд проектів від менш відомих розробників, які покликані спростити взаємодію між учасниками міжнародної торгівлі та логістики, коротко розглянемо найбільш перспективні з них. Розробники Citizens Reserve анонсували запуск закритого блокчейн протоколу «Zerv», який покликаний стати «операційною системою для ланцюга постачання». Мережа, доступ до якої забезпечується токенами з реальним фінансовим забезпеченням, створена підтримувати стабільні безризикові транзакції між ключовими учасниками в ланцюгу постачання [36]. Автоматизацією комерційних процесів та розрахунків зайнялись розробники компанії Libelli. Вони розробили систему блокчейн, яка виступає в ролі банківського агента-посередника між продавцем та покупцем. Система створює систему смарт-контрактів згідно побажань учасників угоди та є альтернативою паперового банкового акредитиву. Libelli заявляють, що їх система виконує ту ж роботу, але в десять раз дешевше, ніж банківська установа. Та-

кож вони мають намір додати функції відслідковування транспортного шляху, походження товару, аукціонні торги та інше, чим не займається банк-посередник [37]. Інший проект під назвою OriginTrail займається наданням надійної та перевіреної інформації учасникам ланцюжку постачання. Ланцюг постачання часто представляється, як один з найефективніших способів застосування технології блокчейн, але розробники заявляють, що поточні децентралізовані рішення не здатні забезпечити відповідний рівень взаємодії, стабільності та ефективності. Заявлено, що їх протокол OriginTrail відповідає високим вимогам децентралізованої мережі [38]. Варто також згадати проект ShipChain, ще одну систему відслідковування вантажів, що опирається на блокчейн. Система відслідковує товар з моменту, коли він покидає конвеєр фабрики, та до його доставки до дверей покупця. Відповідна інформація продукується на всіх етапах ланцюга постачання. Система може виконувати смарт-контракти, як тільки виконуються задані вимоги. Для прикладу, тільки водій з логістичної компанії підтверджує доставку товару покупцю, система автоматично маркує продукцію та завдання, як виконане, та надсилає новий маршрут водієві [39].

3. Смарт-контракти та мова Solidity

Смарт-контракт (англ. Smart contract – “розумний контракт”) – різновид угоди в формі закодованих математичних алгоритмів, укладення, зміна, виконання і розірвання яких можливо лише з використанням комп'ютерних програм (Блокчейн платформ) в рамках мережі Інтернет. Можна сказати, що йдеться про врегулювання відносин сторін шляхом закріплення їх вираженої волі у формі певного коду, який придатний для зчитування комп'ютером. Смарт-контракт базується на основі чіткої логіки і перевірки, або виконання через криптографічні протоколи та інші механізми цифрової безпеки, являє собою різке поліпшення в порівнянні з традиційним контрактом, навіть для деяких традиційних видів договірних положень, які можуть

бути передані під владу комп'ютерних протоколів [40, 41].

Кілька формальних мов були розроблені та запропоновані для визначення договірних положень. [42, 43].

Для розуміння поняття «смарт-контракт», що діє в мережі блокчейн «Ethereum» необхідно спочатку згадати біткоїн – першу та все ще найпопулярнішу відкриту систему блокчейн. Блокчейн біткоїн був розроблений з єдиною метою: передавання валюти біткоїн від одного власника до іншого. Однак з поширенням технології люди почали додавати «метадані» в процесі транзакцій для досягнення інших цілей, таких як завірення та коригування документів.

Система блокчейн Ethereum виникла дещо пізніше та на відміну від інших систем блокчейн Ethereum дає змогу будь-кому створювати «контракти» всередині блокчейн. Цей контракт є комп'ютерною програмою з асоційованою мініатюрною базою даних, яка може бути змінена лише програмою, яка нею володіє. Якщо користувачі блокчейн бажають внести зміни до бази даних, вони повинні вислати повідомлення з цифровим підписом до цього контракту. Код контракту перевіряє ці повідомлення та вирішує як реагувати [44].

Контракти в Ethereum можуть бути написані на одній з декількох мов програмування, найпопулярнішими з яких є Solidity та Serpent. Як і більшість мов програмування, вони відповідають критерію «повноти за Тюрингом», що також означає, що вони мають кільцеву структуру, тобто виконують операції повторно до того часу, коли виконуються задані умови.

Коли в блокчейн створюється Ethereum-контракт, він визначає початкові дані та стан бази даних. Потім контракт призупиняє роботу, очікуючи поки користувач блокчейн (або інший контракт) відправляє повідомлення про транзакцію, після чого контракт знову починає працювати. В залежності від прописаного коду він може ідентифікувати джерело повідомлення, бути тригером для іншого контракту, змінювати базу даних чи надсилати відповідь на запит користувача. Всі ці кроки вико-

нуються незалежно на будь-якій ноді в мережі блокчейн з ідентичними результатами.

Виконання Ethereum-контрактів вимагає певних комп'ютерних потужностей для проведення розрахунків, обчислень та зберігання інформації в мережі. Дана проблема вирішується комісією від клієнта. Користувач, який створює транзакцію, платить за комп'ютерні обчислення, які є тригером контракту, цю комісію отримує «майнер», що підтверджує інформацію та заносить її в блок. Комісія утримується покровоко згідно етапам виконання контракту.

Solidity – одна з чотирьох мов (три інші: Serpent, LLL і Mutan), спроектованих для трансляції в байт-код віртуальної машини Ethereum. Отримала широке поширення з появою технологій блокчейну, зокрема, стека технологій на основі Ethereum, для створення програмного забезпечення розумних контрактів. Мова була запропонована в серпні 2014 року Гейвіном Вудом (Gavin Wood). Надалі розробка мови була виконана під керівництвом Крістіана Райтвізнера (Christian Reitwiessner) командою Solidity в рамках проекту Ethereum [45].

Solidity – об'єктно-орієнтована та предметно-орієнтована мова програмування високого рівня для виконання розумних контрактів, які керують поведінкою грошових рахунків всередині платформи Ethereum [46]. Мова Solidity була створена під впливом C++, Python та JavaScript та розроблена з ціллю взаємодії з віртуальною машиною Ethereum (Ethereum Virtual Machine або EVM). Solidity – статично типізована мова, що підтримує спадкування, бібліотеки та комплексну типізацію, визначену користувачем. На мові Solidity можна створювати контракти з функцією голосування, колективного фінансування (краудфандинг), сліпі аукціони та гаманці з мульти-підписами.

Хоч мова Solidity виглядає дещо схоже на JavaScript та C++, проте вона має ряд синтаксичних додатків, щоб бути придатною та зручною для написання контрактів в Ethereum.

4. Проблеми, які зустрічаються в ланцюгу постачання

Розглянемо типові проблеми, що зустрічаються при перевезенні товарів у міжнародній логістиці та які впливають на якість товарів, та придатність до їх подальшого використання:

1) дотримання відповідного температурного режиму. Деяким товарам (заморожена риба та м'ясо) необхідна досить низька температура ($-18-20^{\circ}$) для підтримання їх в стані глибокої заморозки, іншим товарам (свіжі овочі, фрукти, живі рослини, квіти) необхідна стабільна помірна температура ($+15-20^{\circ}$) для підтримання їх у свіжому стані. Навіть короткочасне коливання температури в заданому режимі може негативно позначитись на їх якості або навіть привести до повної втрати товару;

2) дотримання відповідної вологості повітря. Відомо, що ряд товарів бояться високої вологості або різких її перепадів. Такими товарами, для прикладу, є електротехніка, медикаменти, ряд продовольчих товарів, таких як борошно, крупи та інше. Зазвичай прості вантажні контейнери є досить герметичними, щоб захищати товар від надмірного зволоження, також у контейнер в різних місцях закладається спеціальний силікатний гель, який вбирає надлишки вологи. Проте при тривалих морських та океанічних перевезеннях судно перетинає декілька кліматичних зон, потрапляє під зливи та й просто тривалий час перебуває під впливом вологого морського повітря;

3) термін придатності продукту та його стан до початку транспортування. При дотриманні оптимальних умов транспортування товарів вони можуть витримати тривалий час міжнародних перевезень, який може сягнути двох місяців і навіть більше. Однак слід враховувати стан товарів до початку завантаження та час їх зберігання до моменту продажу або підтвердження угоди. Цей контроль досягається шляхом ветеринарного, фіто-санітарного, епідеміологічного та іншого контролю, який виконується інспекторами відповідних державних органів під час процедур

імпортного та експортного митного оформлення. Тому необхідно забезпечувати швидкий та безперешкодний доступ до цих документів усім зацікавленим сторонам. Для прикладу розглянемо, як Walmart, мережа супермаркетів в США, застосували технологію блокчейн з метою контролю повного ланцюжку постачання продуктів харчування. В кооперації з IBM вони почали роботу над пілотним проектом, який створений з метою посилення прозорості ланцюга постачання та більш ефективного відслідковування шляху товару, після випадку масового отруєння забрудненим листовим салатом. З системою блокчейн, над якою вони нині працюють, було б можливо миттєво відслідкувати всі партії забрудненого салату, швидко їх прибрати з полиць та блокувати постачання від цього виробника [47]. Нещодавно Walmart провели відкрите публічне тестування відслідковування повного шляху постачання манго з Мексики та замороженої свинини з Китаю [48];

4) можливість відслідковування повного ланцюжку постачання товарів з моменту їх виробництва та до моменту отримання кінцевим споживачем. Імпортер, покупець, державні органи країни-отримувача повинні бачити увесь ланцюжок руху товарів та країни їх транзиту з метою відповідного контролю у разі транзиту вантажу через зони можливої небезпеки. Яскравим прикладом служить нещодавні спалахи епідемії африканської свинячої чуми в Україні та ряду сусідніх країн, що призвело до створення карантинних зон та заборони імпорту чи експорту свинячого м'яса з цих регіонів з метою локалізації регіонів поширення епідемії [49, 50]. Однак недобросовісні продавці шляхом транзиту через треті країни та заміну документів через посередників змогли обходити ці заборони та обмеження. Частими також є випадки завезення незвичних для даного регіону шкідників з країн транзиту, в результаті ці шкідники через відсутність природних ворогів швидко призводили до великих втрат урожаю [51, 52]. Тому зробити увесь ланцюжок постачання товарів максимально прозорим, відкритим та доступним для контролю

люючих державних органів є вкрай важливо. Можливо навіть корегувати маршрут для уникнення зон карантину та епідемії у реальному часі;

5) можливість відслідковувати місцезнаходження вантажу в реальному часі. Для планування оплат, обміну дозвільною документацією, відповідного державного контролю необхідно знати максимально точний час прибуття вантажу в країну призначення. Сучасні технології GPS та навігації дають змогу це зробити, проте доступ до цієї інформації повинні мати не лише логістичні оператори та перевізники, а й усі зацікавлені особи та органи. Однією з перших почала звертати увагу на цю проблему відома китайська торгова онлайн платформа Alibaba – через свою дочірню компанію Lynx International, Alibaba застосували технологію блокчейн для відслідковування інформації в міжнародній логістиці. Нині система робить записи специфікації товару, деталі транспортування, митниці, державних інспекцій. Як вони самі зазначили, технологія блокчейн стала для них ідеальним рішенням [47];

б) легкість документообігу та підтвердження оригінальності документів та країни походження вантажів. Лише два десятиліття назад документообіг був повністю паперовим, що призводило до величезних втрат часу на створення документів, перевірку їх оригінальності та пересилання поштою оригіналів зацікавленим особам та державним органам контролю. Сучасні технології електронного документообігу не лише значно скорочують час та полегшують створення документів, але й значно знижують можливість підробки або заміну документів, що було частим явищем в епоху паперових документів. Технологія блокчейн та смарт-контрактів взагалі зводять можливість підробки чи корегування документів шахраями практично до нуля;

7) аварії та інші надзвичайні ситуації в морі, що призводять до псування чи втрати вантажу або значної затримки часу постачання вантажу внаслідок арешту судна до остаточного рішення суду, міжна-

родного морського арбітражу та реакції страхових компаній. Відомо багато випадків, коли через велику кількість учасників та постраждалих від морських аварій суд затягується на багато років. Наприклад, всесвітньо відомою є аварія в Чорному морі комерційного контейнерного танкера CMA CGM Verlaine, що перевозив близько 8700 контейнерів різного типу на борту, та круїзного судна Odessa Star, в результаті чого значна частина вантажу була втрачена, інша частина значно пошкоджена, а контейнери з температурним режимом були відключені від мережі енергопостачання на значний час, крім того для утримання судна на плаву та запобігання втрати всього вантажу команда була вимушена викинути певну частину контейнерів за борт [53, 54]. Судові слухання почалися в жовтні 2010 року, однак станом на вересень 2019 року ситуація все ще остаточно не врегульована. Час судових слухань значно б скоротився за умови достатнього обсягу достовірної та перевіреної інформації про маршрути суден, їх дії безпосередньо до та під час аварій, а також за наявності в контейнерах датчиків, що збирають та передають інформацію про стан товару;

8) своєчасна оплата за товар та гарантії безпеки продавця та покупця. Існує багато варіантів та умов оплати за товар в залежності від стану його готовності та етапу постачання, однак продавець та покупець завжди в тій чи іншій мірі несуть ризик втрати вантажу або коштів. Дана проблема вирішується шляхом механізму банківського акредитиву, коли банк-посередник виступає гарантом здійснення угоди. Класична схема акредитиву виглядає так: банк-гарант утримує кошти покупця як передплату та передає ці кошти або частину коштів поетапно продавцю за умови виконання ним певних умов, зазначених в контракті, наприклад, замитнення товару, приймання на борт судна, висилання оригінальних документів, прибуття в порт призначення та інше. Однак дана класична схема має ряд значних недоліків та незручностей: банк, як фінансовий посередник, утримує значну комісію за свої послуги, дана операція сильно розтягнута

в часі через пересилання паперових документів поштою, а також покупець у виді передплати за товар заморожує кошти на значний період часу. Згідно досліджень [55] щодня в світі у секторі міжнародної логістики заморожується 140 мільярдів доларів США через питання оплати, а також у середньому компанія змушена чекати 42 дні до моменту отримання оплати;

9) затримки в строках постачання. Згідно спільних досліджень компаній IBM та Maersk [56] в середньому простий контейнер з температурним режимом проходить через 30+ різних інстанцій та організацій, що вимагає 200+ комунікаційних зусиль. Будь-яка затримка на будь-якому етапі призводить до зриву строків поставок, а в деяких випадках навіть до втрати вантажу. Також раніше вже зазначалось про черги в доках портів для вивантаження суден;

10) пошук клієнтів/вантажів або перевізників/транспорту. Дана проблема на даний час не є критичною та практично вирішена, тому що, як зазначалося вище, на базі технології блокчейн вже створено безліч платформ та служб, що допомагають клієнтам та перевізникам знайти один одного та контактувати напряму [57].

Для уникнення або мінімізації наслідків зазначених проблем вимагається повний та безперервний контроль за станом заданих параметрів на будь-якому відрізку ланцюга постачання, особливо на стадіях перевантаження між різними логістичними операторами, наприклад, між сухопутним та морським транспортом або перевантаження контейнеру з судна в порт. На короткий час контейнер відключається від енергопостачання, тому надзвичайно важливо стежити за заданими параметрами в цей період та відстежувати можливі критичні відхилення від оптимального стану та тривалість такого періоду. Для прикладу, мінімальна температура зберігання м'яса або риби глибокої заморозки становить -18°C [58], при підготовці до тривалого за часом перевантаження доречно знизити температуру до -20 – -22°C , що дає змогу утримувати температуру в оптимальному діапазоні протягом 15–20

годин за умови, що герметичний контейнер-рефрижиратор не буде відкриватися. Зазвичай цього часу досить, щоб перевантажити контейнер та підключити його до іншої мережі енергопостачання. Однак при мультимодальних міжнародних перевезеннях, коли використовується багато логістичних операторів та перевантажень (сухопутна доставка в країні імпорту та експорту, один або більше морських перевізників, портовий оператор у країні імпорту та експорту) вкрай важливо мати безперервний запис станів заданих параметрів якості товару з метою контролю та виявлення випадків порушень цих параметрів, а також чіткого визначення часу та місця таких порушень, логістичних операторів, винних в цьому.

Технологія блокчейн та смарт-контрактів якщо не повністю вирішують зазначені тут проблеми, то значно мінімізують їх негативний вплив, особливо ефективно в поєднанні з технологіями GPS та програмованими датчиками, що розміщуються всередині контейнерів та контролюють визначені користувачем параметри.

5. Формальна верифікація властивостей перевезень в логістиці

Системи міжнародних перевезень із часом стають складнішими і користувачу логістичних застосунків стає все важче відслідковувати та передбачати проблеми, пов'язані із перевезенням. Великі обсяги даних ускладнюють і автоматичну обробку можливих сценаріїв, оскільки їх кількість росте експоненційно при вирішуванні задач аналізу дотримування умов або властивостей ланцюжка перевезення.

Дану проблему можна вирішувати впровадженням формальних алгебраїчних методів з метою аналізу та дослідження властивостей перевезень. З цією метою в сучасній методології існують такі напрями, як перевірка моделей (model checking), що базується на використанні методів моделювання та статичного доведення властивостей. Метод широко використовується для верифікації формальних моделей, у тому числі логістичних, що реалізують деякий ланцюг постачання. Такі інструме-

нти, як MDIST [59], SPIN [60], MaseMC [61], TLC [62] показали свою практичність в застосуванні до певних індустріальних областей.

Певна складність існує у формалізації моделей, тому що найбільш розвинуті та розширені формальні методи верифікації використовують складну математичну нотацію, наприклад, системи Coq [63] та TLA.

При аналізі безпеки перевезень у моделях також проводиться формальне доведення властивостей безпеки, при чому використовуються логіки вищих порядків та автоматична система доведення теорем [64].

Логістичні моделі належать до розподілених систем, в яких бере участь деяка кількість агентів, що взаємодіють між собою. У верифікації та тестуванні розподілених систем виникає явище експоненційного вибуху, спричиненого паралельною активністю агентів, що завдає труднощі в аналізі сценаріїв логістики.

Логістичні моделі належать також до класу систем, що критичні до безпеки, тому аналіз та доведення їх властивостей стає одною із основних задач, що має вирішуватись ще на ранніх стадіях розробки моделей.

Для оцінки безпеки в логістиці використовуються так звані блок діаграми надійності (Reliability Block Diagrams) [65], які представляють ланцюг постачання. Здебільшого безпека перевезень аналізується за допомогою моделювання.

При розгляданні децентралізованої моделі логістики складність доведень зростає, тому моделювання є недостатнім і для верифікації моделі створеної на основі блокчейну використовують алгебраїчний підхід.

В Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України розроблено теорію інсерційного моделювання [66], об'єктом якої є взаємодія агентів та середовищ. Кожен агент має свій тип, що визначається атрибутами та може взаємодіяти із іншими агентами за допомогою відправки повідомлень один одному. Агент має також свою поведінку, яка складається із дій агента та інших поведінок. Кожна дія агента визначається деякою передумовою,

що дозволяє її виконання та зміною середовища агента. Середовище є сутністю над агентами, що вважаються зануреними в середовище, та взаємодіють із середовищем зміною атрибутів. Середовище має свої атрибути, які відомі всім агентам та може бути багаторівневим.

Модель поведінки агентів та середовища задається за допомогою алгебри поведінок [67], операції якої визначені над діями та поведінками агентів. Такими операціями є префіксінг, недетермінований вибір, паралельна та послідовна композиція поведінок.

Розроблені методи в алгебрі поведінок дозволяють вирішувати задачі верифікації властивостей розподілених систем такі як аналіз повноти та детермінізму, досяжність порушень формалізованих властивостей безпеки, аналіз життєздатності системи, пошук вразливостей та тестування. Блокчейн є розподіленою системою в якій взаємодіючі вузли є агентами, тому розглянуті алгебраїчні методи можуть бути застосовані до логістичної децентралізованої моделі.

Висновки

Отже, підсумовуючи все вищесказане, ми виділили глобальні проблеми, які накопичились у сучасній системі міжнародної логістики, та які можуть бути вирішені за допомогою застосування технології блокчейн та формальних методів:

- децентралізація та відмова від використання потужних стаціонарних серверів, які накопичують та зберігають величезні обсяги інформації;

- безпека зберігання та обміну інформацією. Частково вирішується децентралізацією, мінімізуючи загрози пошкодження чи збою у роботі стаціонарних серверів шляхом винесення інформації у розподілені системи, такі як блокчейн, де інформація дублюється на багатьох носіях (нодах). Також безпека досягається шляхом кодування та шифрування інформації, та можливістю доступу до неї тільки тим особам, які мають до неї безпосереднє відношення. Ще однією великою перевагою є неможливість фізичного втручання людини до попередньо внесеної інформації та

зміни нею цієї інформації із зловмисних чи інших мотивів, так як технологія блокчейн аналізує та валідує будь-які зміни інформації, що вносяться до розподіленої бази даних;

– доступність – клієнт з мінімальним рівнем технічних знань має можливість здійснювати необхідні йому операції за допомогою комп'ютера чи мобільного телефону за допомогою спеціальних додатків та програм;

– швидкодія – розподілені системи прискорюють реакцію робочої екосистеми на запит оператора, ніж стаціонарний сервер, який у часи максимального навантаження може досить довго обробляти інформацію та відповідати на запит оператора;

– економія часу та людських ресурсів – розподілені системи обробляють інформацію та відповідно реагують на неї у тисячі разів швидше, ніж людина, що дозволяє економити час та людські ресурси;

– усунення людського фактору. Більшість затримок у роботі системи та, як наслідок, втрат часу та ресурсів відбувається через людський фактор (неправильне трактування інформації, пізня реакція на збій, ігнорування сигналів системи, низька кваліфікація, природня фізична обмеженість швидкості реакції людини та аналіз інформації тощо), тому доцільно намагатися максимально усунути залежність системи від людського фактору.

Розглянувши основні проблеми в ланцюжку постачання та контролю якості товарів у міжнародній логістиці, ми бачимо величезний потенціал розвитку та застосування технології блокчейн, смарт-контрактів на її основі, які вирішують або значно спрощують ці проблеми:

– можливість постійного та безперервного контролю дотримання заданих параметрів, наприклад, температурного режиму та вологості, відслідковування порушень та чітке визначення часу, місця та етапу такого порушення;

– можливість відслідковування повного шляху товару в ланцюжку постачання, тобто від дверей виробника до дверей покупця;

– прискорення документообігу, спрощення порядку створення, верифікації документів, підвищення рівня надійності, підтвердження оригінальності документів та інформації.

– відслідковування великої кількості об'єктів логістики в реальному часі, корегування оптимального маршруту, пошук найближчого та найбільш відповідного характеристикам вантажу транспортно-го засобу, можливість отримання незалежної правдивої інформації про дії логістичних операторів під час колізій, аварій та інших небажаних випадків;

– зростання надійності та безпеки міжнародних торгових операцій, строків постачань та оплати через використання смарт-контрактів, прискорення розрахунків та виконання умов контрактів.

Література

1. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System (2008).
2. Crosby M., Pattanayak P., Verma S., Kalyanaraman V. Blockchain technology: beyond bitcoin. *Appl. Innov.* 2016. 2(6). P. 6–10.
3. McPhee C., Ljusic A. Blockchain. *Technol. Innov. Manag. Rev.* 2017. 7(10). P. 3–5.
4. Electricity journal homepage: blockchain technology: will it make a difference? *Electr. J.* 2017. 30 (3). P. 86–87.
5. Finextra: Marine Transport International Applies Blockchain to Shipping Supply Chain (2016). URL: <https://www.finextra.com/pressarticle/66223/marine-transportinternational-applies-blockchain-to-shipping-supply-chain>
6. Solesvik M.Z. Interfirm collaboration in the shipbuilding industry: the shipbuilding cycle perspective. *Int. J. Bus. Syst. Res.* 2011. 5(4). P. 388–405.
7. Official website of International Maritime Organization. URL: <http://www.imo.org>.
8. Den Norske Veritas – DNV GL: Making your Asset Smarter with the Digital Twin. URL: <https://www.dnvgl.com/article/making-your-asset-smarter-with-the-digital-twin-63328>.
9. The Economist. The data deluge, 25 Feb 2010. URL: <http://www.economist.com/node/15579717>.

10. Tien J.M.: Internet of connected servgoods: considerations, consequences and concerns. *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* 2015. 24(2). P. 130–167.
11. Splash 24: Dr. Martin Stopford on the Future of Shipping. URL: <http://splash247.com/drmartinstopford-future-shipping>
12. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V., Korobko O.V., Topalov A.M. Internet of things approach for automation of the complex industrial systems. In: ICTERI-2017, CEUR Workshop Proceedings Open Access. 2017. Vol. 1844. P. 3–18. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3ff6/4e4a07be1e8c2f0b16f4736397be1405218a.pdf>
13. Tachizawa E.M., Alvarez-Gil M.J., Montes-Sancho M.J. How “smart cities” will change supply chain management. *Supply Chain Manag. Int. J.* 2015. 20(3). P. 237–248.
14. Hahn G.J., Packowski J. A perspective on applications of in-memory analytics in supply chain management. *Decis. Support Syst.* 2015. 76(1). P. 45–52.
15. Lacey M., Lisachuk H., Giannopoulos A., Ogura A. Shipping smarter: IoT opportunities in transport and logistics. *The Internet of Things in Shipping*. Dupress-Deloitte. 2015.
16. Offshore Energy Today: Meet Onboard, the Maritime Internet of Things. URL: http://www.offshoreenergytoday.com/oeec-meet-onboard-the-maritime-internet-of-things/?utm_source=emark&utm_medium=email&utm_campaign=daily-update-offshore-energy-today-2017-10-02&uid=207087.
17. Maritime: Six Maritime Start-Ups That Are Changing the GAME. URL: <https://knect365.com/talentandtraining/article/1149354e-68d9-4e74-9f91-a900ac869526/6-maritime-startupsthat-are-changing-the-game>.
18. Den Norske Veritas – DNV GL: Certificates in the blockchain. URL: <https://www.dnvgl.com/assurance/certificates-in-the-blockchain.html>.
19. Den Norske Veritas – DNV GL: Blockchains in the shipping world. URL: <https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/Blockchains-in-the-shipping-world.html>.
20. Maersk and IBM Introduce TradeLens Blockchain Shipping Solution. Aug. 9, 2018. URL: <https://newsroom.ibm.com/2018-08-09-Maersk-and-IBM-Introduce-TradeLens-Blockchain-Shipping-Solution>.
21. TradeLens – official website. URL: <https://www.tradelens.com>.
22. Forbes. IBM-Maersk Blockchain Platform Adds 92 Clients As Part Of Global Launch. URL: <https://www.forbes.com/sites/michael-delcastillo/2018/08/09/ibm-maersk-blockchain-platform-adds-92-clients-as-part-of-global-launch-1/#c469d5068a4a>.
23. Coindesk. IBM and Maersk Struggle to Sign Partners to Shipping Blockchain. Oct 26, 2018. URL: <https://www.coindesk.com/ibm-blockchain-maersk-shipping-struggling>
24. Computerworld. Maersk adds two big shipping firms to its blockchain ledger. 29 травня 2019p. URL: <https://www.computerworld.com/article/3398923/maersk-adds-two-big-shipping-firms-to-its-blockchain-ledger.html>
25. TC. IBM-Maersk blockchain shipping consortium expands to include other major shipping companies. URL: <https://techcrunch.com/2019/05/28/ibm-maersk-blockchain-shipping-consortium-expands-to-include-other-major-shipping-companies/>
26. TradeLens official brochure. Solution brief. Edition two.
27. SupplyChain Dive. 9 ocean carriers, terminal operators join new blockchain initiative to rival TradeLens. Nov. 7, 2018. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/ocean-carriers-new-blockchain-cosco-cma-cgm/541630/>
28. CargoSmart. Global Shipping Business Network. URL: <https://www.cargosmart.ai/en/>
29. Globe news wire. Top Ocean Carriers and Terminal Operators Initiate Blockchain Consortium. November 06, 2018. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/11/06/1646014/0/en/Top-Ocean-Carriers-and-Terminal-Operators-Initiate-Blockchain-Consortium.html>
30. Supply Chain Dive. Maersk blockchain solution TradeLens adds ZIM. April 22, 2019. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/maersk-blockchain-solution-tradelens-adds-zim/553146/>
31. Ball B. Reducing Global Logistics Cost with Benchmarking and Shipping Container Pricing Transparency. Aberdeen Group. 2016.
32. Dhanji T. Blockchain – Where Oil and Gas Traders Dare to Trade. Ernest Young Publications. 2017. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/blockchain-where-oilgas-traders-dare-tread-talib-dhanji>
33. Freight Waves.: Swiss firm brings blockchain to the biopharmaceutical cold chain. 02/23/2018. URL: <https://www.freightwaves.com/news/blockchain/skycellblockchain-oldchain>.
34. John G. Smith.: Block by Block: How blockchain will transform trucking. 18.01.2018. URL: <https://www.todaystruc->

- king.com/block-block-blockchain-will-transform-trucking/
35. Ana Alexandre.: New Blockchain-Based Supply Chain System Is Presented by Microsoft and Adents. URL: <https://cointelegraph.com/news/new-blockchain-based-supply-chain-system-is-presented-by-microsoft-and-ardents>
 36. Suku. The future of supply chain is here. URL: <https://www.suku.world/>
 37. DHL Trend Research. URL: <https://www.logistics.dhl/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-blockchain-trend-report.pdf>
 38. OriginTrail. URL: <https://origintrail.io>
 39. Shipchain. The end-to-end logistics platform of the future: trustless, transparent tracking. URL: <https://shipchain.io/>
 40. Nick Szabo – Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets. URL: www.fon.hum.uva.nl
 41. Nick Szabo. Formalizing and Securing Relationships on Public Networks.
 42. Welcome to ERights.Org. URL: erights.org
 43. A Formal Language for Analyzing Contracts. URL: vwh.net
 44. Gideon Greenspan.: Smart contracts make slow blockchains. URL: <https://www.multichain.com/blog/2015/11/smart-contracts-slow-blockchains>
 45. StackEdit Viewer / Benoit Schwebelin. URL: <https://stackedit.io/viewer#!url=https://gist.github.com/gavofyork/31b35cd2252a00d0d057/raw/16de06189d2175d2e31b300f1f8531e20c927635/solidity-original>
 46. Solidity – Solidity 0.2.0 documentation. URL: <https://solidity.readthedocs.io/en/latest/>
 47. Zigurat. Blockchain Success cases: Supply Chain and Logistics. URL: <https://www.ezigurat.com/innovation-school/blog/blockchain-success-cases/>
 48. Robert Hackett.: Walmart and 9 Food Giants Team Up on IBM Blockchain Plans. URL: <https://fortune.com/2017/08/22/walmart-blockchain-ibm-food-nestle-unilever-tyson-dole/>
 49. Карта випадків африканської чуми свиней в Україні та зони карантину. URL: <http://www.asf.vet.ua/index.php/asfinukraine>
 50. Державна служба України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів: Африканська чума свиней? URL: <http://www.asf.vet.ua/index.php/purpose-project/about-asf/124-african-swine-fever>
 51. Укрінформ. Нашестя метеликів – розплата за людську необачність. 03.06.2019 URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2713807-nasesta-metelikiv-rozplata-za-ludsku-nenazerlivist.html>
 52. Petropavlivka. City. Миколаївку атакує гусинь. 05.06.2019 URL: <https://petropavlivka.city/read/experiance/33845/mikolaivku-atakue-gusin>
 53. Carnet Maritime. Collision CMA CGM Verlainne et Odessa Star. 04.04.2010 URL: <http://carnet-maritime.com/accidents-naufrages/collision-cma-cgm-verlainne-et-odessa-star.html>
 54. Информационный портал «Транспортный бизнес Украины». К ситуации столкновения контейнеровоза Verlainne и теплохода Odessa Star 4 апреля в Мраморном море - Международная юридическая служба. URL: http://tbu.com.ua/news/k_situatsii_stolknoveniia_konteinerovoza_verlainne_i_teplohoda_odessa_star_4_aprelia_v_mramornom_more___mejdunarodnaia_uridicheskaia_slujba_foto.html
 55. Cristina Commendatore.: Blockchain in trucking: What about the middlemen? 20.10.2017 URL: <https://www.fleetowner.com/electronic-security/blockchain-trucking-what-about-middlemen>
 56. Robert Hackett.: IBM and Maersk Are Creating a New Blockchain Company. 16.01.2017 URL: <https://fortune.com/2018/01/16/ibm-blockchain-maersk-company/>
 57. Winnesota.: How blockchain is revolutionizing the world of transportation and logistics. URL: <https://www.winnesota.com/blockchain>
 58. Temperature Measurement in the Fish Industry. URL: <http://www.fao.org/3/x5992e/X5992e01.htm>
 59. Yang J., Chen T., Wu M., Xu Z., Liu X., Lin H., Yang M., Long F., Zhang L., Zhou L. 2009. MODIST: transparent model checking of unmodified distributed systems. URL: https://www.usenix.org/legacy/events/nsdi09/tech/full_papers/yang/yang_html/index.html
 60. Spin. URL: <http://spinroot.com/spin/whatispin.html>
 61. Killian C., Anderson J.W., Jhala R., Vahdat A. 2006. Life, death, and the critical transition: finding liveness bugs in system code. URL: http://www.macesystems.org/papers/MaceMC_TR.pdf
 62. Lamport L., Yu Y. 2011. TLC—the TLA+ model checker. URL: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/lamport/tla/tlc.html>

63. Wilcox J.R., Woos D., Panchekha P., Tatlock Z., Wang X., Ernst M.D., Anderson T. 2015. Verdi: a framework for implementing and formally verifying distributed systems. Proceedings of the ACM SIGPLAN 2015 Conference on Programming Language Design and Implementation: 357-368. URL: <https://homes.cs.washington.edu/~mernst/pubs/verify-distsystem-pldi2015-abstract.html>
64. Towards Formal Reliability Analysis of Logistics Service Supply Chains using Theorem Proving Waqar Ahmed , Osman Hasan , and Sofi`ene Tahar EPiC Series in Computing Volume 40, 2016, Pages 1–14 IWIL-2015. 11th International Workshop on the Implementation of Logics
65. Li Y., Yi H. Research on the Inherent Reliability and the Operational Reliability of the Supply Chain. u- and e-Service, Science and Technology. 2014. 7(1). P. 104–112.
66. Letichevsky A., Letychevskiy O., Peschanenko V. “Insertion Modeling and Its Applications”, Computer Science Journal of Moldova. 2016. Vol. 24. Issue 3. P. 357–370.
67. Letichevsky A. and Gilbert D. “Interaction of agents and environments,” in: Recent Trends in Algebraic Development Technique, LNCS 1827 (D. Bert and C. Choppy, eds.), Springer-Verlag, 1999.
7. Official website of International Maritime Organization. URL: <http://www.imo.org>.
8. Den Norske Veritas – DNV GL: Making your Asset Smarter with the Digital Twin. URL: <https://www.dnvgl.com/article/making-your-asset-smarter-with-the-digital-twin-63328>.
9. The Economist. The data deluge, 25 Feb 2010. URL: <http://www.economist.com/node/15579717>.
10. Tien J.M.: Internet of connected servgoods: considerations, consequences and concerns. J. Syst. Sci. Syst. Eng. 2015. 24(2). P. 130–167.
11. Splash 24: Dr. Martin Stopford on the Future of Shipping. URL: <http://splash247.com/dr-martinstopford-future-shipping>
12. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V., Korobko O.V., Topalov A.M.: Internet of things approach for automation of the complex industrial systems. In: ICTERI-2017, CEUR Workshop Proceedings Open Access. 2017. Vol. 1844. P.3–18. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3ff6/4e4a07be1e8c2f0b16f4736397be1405218a.pdf>
13. Tachizawa E.M., Alvarez-Gil M.J., Montes-Sancho M.J.: How “smart cities” will change supply chain management. Supply Chain Manag. Int. J. 2015. 20(3). P. 237–248.
14. Hahn G.J., Packowski J.: A perspective on applications of in-memory analytics in supply chain management. Decis. Support Syst. 2015. 76(1). P.45–52.
15. Lacey M., Lisachuk H., Giannopoulos A., Ogura A.: Shipping smarter: IoT opportunities in transport and logistics. The Internet of Things in Shipping. Dupress-Deloitte. 2015.
16. Offshore Energy Today: Meet Onboard, the Maritime Internet of Things. URL: http://www.offshoreenergytoday.com/oec-meet-onboard-the-maritime-internet-of-things/?utm_source=emark&utm_medium=email&utm_campaign=daily-update-offshore-energy-today-2017-10-02&uid=207087.
17. Maritime: Six Maritime Start-Ups That Are Changing the GAME. URL: <https://knect365.com/talentandtraining/article/1149354e-68d9-4e74-9f91-a900ac869526/6-maritime-startupsthat-are-changing-the-game>.
18. Den Norske Veritas – DNV GL: Certificates in the blockchain. URL: <https://www.dnvgl.com/assurance/certificates-in-the-blockchain.html>.
19. Den Norske Veritas – DNV GL: Blockchains in the shipping world. URL: <https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/Blockchains-in-the-shipping-world.html>.
20. Maersk and IBM Introduce TradeLens

References

1. Nakamoto S.: Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System (2008).
2. Crosby M., Pattanayak P., Verma S., Kalyanaraman V.: Blockchain technology: beyond bitcoin. Appl. Innov. 2016. 2(6),P. 6–10.
3. McPhee C., Ljusic A.: Blockchain. Technol. Innov. Manag. Rev. 2017. 7(10). P. 3–5.
4. Electricity journal homepage: blockchain technology: will it make a difference? Electr. J. 2017. 30 (3). P. 86–87.
5. Finextra: Marine Transport International Applies Blockchain to Shipping Supply Chain (2016). URL: <https://www.finextra.com/pressarticle/66223/marine-transportinternational-applies-blockchain-to-shipping-supply-chain>
6. Solesvik M.Z.: Interfirm collaboration in the shipbuilding industry: the shipbuilding cycle perspective. Int. J. Bus. Syst. Res. 2011. 5(4). P. 388–405.

- Blockchain Shipping Solution. Aug. 9, 2018. URL: <https://newsroom.ibm.com/2018-08-09-Maersk-and-IBM-Introduce-TradeLens-Blockchain-Shipping-Solution>.
21. TradeLens – official website. URL: <https://www.tradelens.com>.
 22. Forbes. IBM-Maersk Blockchain Platform Adds 92 Clients As Part Of Global Launch. URL: <https://www.forbes.com/sites/michael-delcastillo/2018/08/09/ibm-maersk-blockchain-platform-adds-92-clients-as-part-of-global-launch-1/#c469d5068a4a>.
 23. Coindesk. IBM and Maersk Struggle to Sign Partners to Shipping Blockchain. Oct 26, 2018. URL: <https://www.coindesk.com/ibm-blockchain-maersk-shipping-struggling>
 24. Computerworld. Maersk adds two big shipping firms to its blockchain ledger. 29 травня 2019р. URL: <https://www.computerworld.com/article/3398923/maersk-adds-two-big-shipping-firms-to-its-blockchain-ledger.html>
 25. TC. IBM-Maersk blockchain shipping consortium expands to include other major shipping companies. URL: <https://techcrunch.com/2019/05/28/ibm-maersk-blockchain-shipping-consortium-expands-to-include-other-major-shipping-companies/>
 26. TradeLens official brochure. Solution brief. Edition two.
 27. SupplyChain Dive. 9 ocean carriers, terminal operators join new blockchain initiative to rival TradeLens. Nov. 7, 2018. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/ocean-carriers-new-blockchain-cosco-cma-cgm/541630/>
 28. CargoSmart. Global Shipping Business Network. URL: <https://www.cargosmart.ai/en/>
 29. Globe news wire. Top Ocean Carriers and Terminal Operators Initiate Blockchain Consortium. November 06, 2018. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/11/06/1646014/0/en/Top-Ocean-Carriers-and-Terminal-Operators-Initiate-Blockchain-Consortium.html>
 30. Supply Chain Dive. Maersk blockchain solution TradeLens adds ZIM. April 22, 2019. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/maersk-blockchain-solution-tradelens-adds-zim/553146/>
 31. Ball B. Reducing Global Logistics Cost with Benchmarking and Shipping Container Pricing Transparency. Aberdeen Group. 2016.
 32. Dhanji T.: Blockchain – Where Oil and Gas Traders Dare to Trade. Ernest Young Publications. 2017. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/blockchain-where-oilgas-traders-dare-tread-talib-dhanji>
 33. Freight Waves.: Swiss firm brings blockchain to the biopharmaceutical cold chain. 02/23/2018. URL: <https://www.freightwaves.com/news/blockchain/skycellblockchain-oldchain>.
 34. John G. Smith.: Block by Block: How blockchain will transform trucking. 18.01.2018. URL: <https://www.todaystrucking.com/block-block-blockchain-will-transform-trucking/>
 35. Ana Alexandre.: New Blockchain-Based Supply Chain System Is Presented by Microsoft and Adents. URL: <https://cointelegraph.com/news/new-blockchain-based-supply-chain-system-is-presented-by-microsoft-and-ardents>
 36. Suku. The future of supply chain is here. URL: <https://www.suku.world/>
 37. DHL Trend Research. URL: <https://www.logistics.dhl/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-blockchain-trend-report.pdf>
 38. OriginTrail. URL: <https://origintrail.io>
 39. Shipchain. The end-to-end logistics platform of the future: trustless, transparent tracking. URL: <https://shipchain.io/>
 40. Nick Szabo – Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets. URL: www.fon.hum.uva.nl
 41. Nick Szabo. Formalizing and Securing Relationships on Public Networks.
 42. Welcome to ERights.Org. URL: erights.org
 43. A Formal Language for Analyzing Contracts. URL: vwh.net
 44. Gideon Greenspan.: Smart contracts make slow blockchains. URL: <https://www.multichain.com/blog/2015/11/smart-contracts-slow-blockchains>
 45. StackEdit Viewer / Benoit Schwebelin. URL: <https://stackedit.io/viewer#!url=https://gist.github.com/gavofyork/31b35cd2252a00d0d057/raw/16de06189d2175d2e31b300f1f8531e20c927635/solidity-original>
 46. Solidity – Solidity 0.2.0 documentation. URL: <https://solidity.readthedocs.io/en/latest/>
 47. Zigurat. Blockchain Success cases: Supply Chain and Logistics. URL: <https://www.e-zigurat.com/innovation-school/blog/blockchain-success-cases/>
 48. Robert Hackett.: Walmart and 9 Food Giants Team Up on IBM Blockchain Plans. URL: <https://fortune.com/2017/08/22/walmart-blockchain-ibm-food-nestle-unilever-tyson-dole/>

49. Map of cases of African swine fever in Ukraine and quarantine areas. [In Ukrainian] URL: <http://www.asf.vet.ua/index.php/asfinukraine>
50. The State Service of Ukraine for Food Safety and Consumer Protection: African swine fever? [In Ukrainian] URL: <http://www.asf.vet.ua/index.php/purpose-project/about-asf/124-african-swine-fever>
51. Ukrinform. The butterfly invasion is the pay for human indiscretion. 03.06.2019. [In Ukrainian] URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2713807-nasesta-metelikiv-rozplata-za-ludsku-nenazerlivist.html>
52. Petropavlivka.City. Mykolayivka is attacked by a caterpillar. 05.06.2019. [In Ukrainian] URL: <https://petropavlivka.city/read/experience/33845/mikolaivku-atakue-gusin>
53. Carnet Maritime. Collision CMA CGM Verlaine et Odessa Star. 04.04.2010 URL: <http://carnet-maritime.com/accidents-naufrages/collision-cma-cgm-verlaine-et-odessa-star.html>
54. Information portal "Transport business of Ukraine". On the situation of collision of the container carrier Verlaine and the ship Odessa Star on April 4 in the Marmara Sea - International Legal Service. [In Ukrainian] URL: http://tbu.com.ua/news/k_situatsii_stolknovenii_konteinerovoza_verlaine_i_tepl_ohoda_odessa_star_4_aprelia_v_mramornom_more__mejdunarodnaia_uridicheskaia_sluj_ba_foto.html
55. Cristina Commendatore.: Blockchain in trucking: What about the middlemen? 20.10.2017 URL: <https://www.fleetowner.com/electronic-security/blockchain-trucking-what-about-middlemen>
56. Robert Hackett.: IBM and Maersk Are Creating a New Blockchain Company. 16.01.2017 URL: <https://fortune.com/2018/01/16/ibm-blockchain-maersk-company/>
57. Winnesota.: How blockchain is revolutionizing the world of transportation and logistics. URL: <https://www.winnesota.com/blockchain>
58. Temperature Measurement in the Fish Industry. URL: <http://www.fao.org/3/x5992e/X5992e01.htm>
59. Yang, J., Chen, T., Wu, M., Xu, Z., Liu, X., Lin, H., Yang, M., Long, F., Zhang, L., Zhou, L. 2009. MODIST: transparent model checking of unmodified distributed systems. URL: https://www.usenix.org/legacy/events/n_sdi09/tech/full_papers/yang/yang_html/index.html
60. Spin. URL: <http://spinroot.com/spin/whatispin.html>
61. Killian, C., Anderson, J. W., Jhala, R., Vahdat, A. 2006. Life, death, and the critical transition: finding liveness bugs in system code. URL: http://www.macesystems.org/papers/MaceMC_TR.pdf
62. Lamport, L., Yu, Y. 2011. TLC—the TLA+ model checker. URL: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/lamport/tla/tlc.html>
63. Wilcox J. R., Woos D., Panchekha P., Tatlock Z., Wang X., Ernst M. D., Anderson T. 2015. Verdi: a framework for implementing and formally verifying distributed systems. Proceedings of the ACM SIGPLAN 2015 Conference on Programming Language Design and Implementation: 357-368. URL: <https://homes.cs.washington.edu/~mernst/pubs/verify-distssystem-pldi2015-abstract.html>
64. Towards Formal Reliability Analysis of Logistics Service Supply Chains using Theorem Proving Waqar Ahmed , Osman Hasan , and Sofi'ene Tahar EPiC Series in Computing Volume 40, 2016, Pages 1–14 IWIL-2015. 11th International Workshop on the Implementation of Logics
65. Li Y., Yi H. Research on the Inherent Reliability and the Operational Reliability of the Supply Chain. u- and e-Service, Science and Technology. 2014. 7(1). P. 104–112.
66. Letichevsky A., Letychevskiy O., Peschanenko V. "Insertion Modeling and Its Applications", Computer Science Journal of Moldova. 2016. Vol. 24. Issue 3. P. 357–370.
67. Letichevsky A. and Gilbert D. "Interaction of agents and environments," in: Recent Trends in Algebraic Development Technique, LNCS 1827 (D. Bert and C. Choppy, eds.), Springer-Verlag, 1999.

Одержано 20.11.2019

Про авторів:

Летичевський Олександр Олександрович,
доктор фізико-математичних наук,
завідувач відділу теорії
цифрових автоматів.
Кількість наукових публікацій в
українських виданнях – 32.
Кількість наукових публікацій в
зарубіжних виданнях – 37.
Індекс Гірша – 4.
<https://orcid.org/0000-0003-0856-9771>,

Горбатюк Сергій Олександрович,
аспірант кафедри Комп'ютерних наук та
інформаційних технологій.
<https://orcid.org/0000-0001-6834-4211>.

Місце роботи авторів:

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
НАН України.
03187, м. Київ
проспект Академіка Глушкова, 40.
Тел.: (044) 526 20 08.

E-mails: gorbatiuk_sergiy@i.ua,
lit@issukraine.com