

УДК 539.3

ПРО ОБВАЛ МІЖНАРОДНОГО ТОРГОВОГО ЦЕНТРУ В НЬЮ- ЙОРКУ 11 ВЕРЕСНЯ 2001 РОКУ¹

Геннадій ЧЕРЕПАНОВ

Маямі, Флорида, США

Загальноприйняте пояснення обвалу веж Міжнародного торгового центру (МТЦ) 11 вересня 2001 базується на спекулятивній „теорії” почергової втрати стійкості утримувальних колон зі швидкістю вільного падіння, що зумовлена втратою стійкості за умов повзучості колон аварійного поверху, які перебували під впливом руйнівної пожежі від розлитого палива і наступного динамічного удару верхніх конструкцій. У цій статті доведено, що ця офіційна „теорія” невірна, оскільки вона побудована на помилкових припущеннях і неправильних обчисленнях. „Теорія” не може пояснити вільне падіння, звук вибуху, перетворення на пил будинків так само, як і інші факти цієї події. Одночасний обвал сусідньої 47-поверхової вежі безпосередньо суперечить „теорії”. З’ясовано, що сумісний із усіма відомими фактами предмету обговорення сценарій усіх обвалів був таким: (i) нагрівання несучих колон у „гарячій плямі” зумовило появу високих стискувальних теплових напружень у цих колонах, (ii) ці напруження разом із внутрішніми напруженнями спричинили хвилю руйнування, і (iii) ця хвиля руйнування менше, ніж за 0,1 секунди, роздробила весь будинок невидимими тріщинами, створюючи звук вибуху і забезпечуючи умови, необхідні для вільного падіння сталевих фрагментів і виникнення хмар пилу з дрібнесеньких шматочків скла, мармуру і бетону. Теорія хвиль руйнування (див. додаток 1) обґрунтовує цей сценарій. Офіційна „теорія” подана в додатку 2.

Ключові слова: Міжнародний торговий центр, вежа, будинок, колона, обвал, вибух, вільне падіння конструкцій, руїни, перетворення конструкції на пил, хвиля руйнування, теплові напруження, внутрішні напруження, повзучість, втрата стійкості, динамічний удар, прогресуюче руйнування, пусковий механізм, точний аналіз проти наближеного.

Передмова до українського перекладу. Тривають наукові дискусії з приводу обвалу веж Міжнародного торгового центру (МТЦ) 11 вересня 2001. Основними виявилися два погляди на причини цієї події. Наукове трактування, яке було прийняте за офіційне пояснення причин руйнування, запропонували у своїй праці З.П.Базант та Ю.Жоу (Z.P.Bazant and Y.Zhou). Один із найвідоміших фахівців у галузі механіки руйнування Г.П.Черепанов вступив у гостру полеміку з приводу цих оглядів. Свої міркування він виклав у доволі великій статті, виставленій на власному сайті (<http://www.genadycherepanov.com/911.asp>). Багато журналів, у тому числі й Росії та Україні надрукували її мовою оригіналу (англійською). Для того, щоб наблизити цей цікавий та повчальний матеріал до українських науковців, інженерів, аспірантів і студентів та показати, як механіка розв’язує складні задачі, за згодою Г.П.Черепанова подаємо тут дещо скорочений переклад цієї праці. Матеріали праці З.П.Базанта та Ю.Жоу

© Черепанов Г., 2010

¹ Переклад О.Є.Андрейківа, Я.М.Пастернака, Г.Т.Сулима.
Друкується в авторській редакції.

містяться у додатку 2 до цієї публікації. Хочемо також, щоб читачі побачили можливість вирішення складних проблем простими і цілком доступними для них засобами, відчули смак наукової дискусії і самі вирішили, які аргументи для них є переконливішими.

1. **Вступ.** „Як Ви думаєте, чому вежі обвалилися?“ – запитав Ларі свого гостя, видатного члена Комісії „11 вересня“, на недавньому шоу Ларі Кінга. „Подія все ще розслідується“ – відповів гість. Очевидно, публіка, поки що не сприйняла „теорію“ Базанта і Жоу (Bazant and Zhou [1]). Тим часом технічне співтовариство без жодного сумніву визнало „теорію“ вірною і повноцінною. Автор цієї статті відчув це офіційне визнання на власній шкурі після того, як редактори й анонімні рецензенти численних технічних журналів відмовилися публікувати його розуміння обвалу як протиставлення до цієї „теорії“. Найважливішим висновком Базанта і Жоу, отриманим з їхнього аналізу, було те, що обвал МТЦ був неминучим наслідком терористичного акту. Цей висновок був необхідним для обох сторін. Для американського уряду – щоб здійснити запланований раніше поворот до нової політики. Терористам – для визнання успішною їхньої стратегії та для сприяння початку джихаду у всьому світі. Тим часом, на думку того ж таки технічного співтовариства цей теракт не міг спричинити обвал МТЦ. Іншими словами, усі люди були б евакуйовані з будинків протягом пожежі і 300 пожежникам не наказували б піднятися нагору, тобто замість трьох тисяч жертв загинуло би не більше ста чоловік. Обвал стався зненацька. Моя точка зору, доведена нижче, полягає в тому, що аналіз та висновки Базанта і Жоу неправильні і що обвал був результатом недостатнього знання механізмів руйнування, а особливо хвилі руйнування, яку механіки не беруть до відома ані при проектуванні висотних будівель, ані при передбаченні того, що може статися після теракту.

„Теорія“ запропонувала такий сценарій обвалу: втрата стійкості за умов повзучості несучих колон критичного поверху, вільне падіння і динамічний удар верхніх конструкцій, і поступове, поверх за поверхом, руйнування внаслідок втрати стійкості колон нижчих конструкцій. Ця „теорія“ не здатна була пояснити такі відомі факти про предмет обговорення:

(i) режим вільного падіння всіх обвалів;

(ii) звук вибуху, утворений кожним обвалом;

(Звук утворюється внаслідок розтріскування. Якби розтріскування тривало протягом десяти секунд, як це стверджує „теорія“, було би чути гучний глухий шум, а не вибух.)

(iii) перетворення на пил зруйнованих будинків.

(Відповідно до „теорії“ руїни після обвалу мали би складатися зі шматків сталевих колон завдовжки приблизно два метри, і не більше.)

Відповідно до „теорії“ сусідній 47-поверховий будинок **не повинен** би був зруйнуватися. Але це сталося.

Відповідно до „теорії“ Емпайр-стейт-билдінг повинен був зруйнуватися ще в 1945 р. за умов подібної катастрофи літака і наступної пожежі. Але цього не сталося.

Тим часом, для кожної людини, знайомої з промисловими вибухами, коли за планового руйнування будівля знищується рівномірно розподіленою

вибухівкою для того, щоб утворилися невеликі за розмірами уламки, що легко транспортуються, обвал МТЦ разюче нагадав цей спланований вибух, викликаний попередньо розподіленими зарядами вибухівки. Дійсно, кожен з обвалів веж тривав приблизно десять секунд, тобто всі частини кожного будинку падали вільно, без будь-якого опору. Те ж саме трапляється після того, як будинок роздріблений вибухівкою. Не дивно, що теорія змови, сумісна з відомими фактами предмету обговорення, всупереч офіційній „теорії” стала широко розповсюдженою у світі. У промові на популярному каналі телебачення C-SPAN 18 квітня і 7 травня 2005 р. Девід Рей Гріффін, котрий є відомою громадською особою у США, дав короткий огляд подій 11 вересня 2001. Він зазначив наступні факти: (i) Близькі зв'язки сімейств Буша і бен Ладена у спільному нафтовому бізнесі в Саудівській Аравії; (ii) бен Ладен був агентом ЦРУ в 1980-их, коли він воював проти росіян в Афганістані; (iii) Ніхто із сімейства бен Ладена (брати, сестри, дружини, дорослі діти) ніколи не затримувалися чи переслідувалися за рішенням суду; (iv) Багатьом членам родини бен Ладена, що мешкали в США до 11 вересня 2001 і святкували ці події, дозволили без будь-якого розслідування залишити США, використовуючи літак, що летів над американською територією 12 вересня 2001, коли всі інші польоти були суворо заборонені; (v) Декотрі з 19 терористів, що виконали місію самогубства 11 вересня 2001, були напередодні заарештовані через недійсні документи, але якимось чудом вони звільнилися; (vi) ФБР і ЦРУ знали про теракт наперед; (vii) У грудні 2001, коли бен Ладен був у Тора-Бора – що було відомо американській розвідці – військові США відмовилися від нападу на загони бен Ладена і дозволили йому втекти; (viii) Розслідування обвалу веж МТЦ було доручене Національному Інституту Стандартів (NIST), що є урядовим закладом, а не набагато престижнішим установам, таким як МТІ (Масачусетський технологічний інститут) або Гарвард, що є приватними і більш незалежними установами (дійсно, наскільки я знаю, у NIST взагалі немає жодних експертів із механіки руйнування); (ix) США виплекали Аль Каїду і багато її гілок, включаючи й чеченські формування. Терористичні організації співпрацювали з ЦРУ та іншими американськими спецслужбами, що вибирали, фінансували, інструктували і спрямовували терористів. Багато фактів цієї співпраці можна також знайти в книзі Нафіз Ахмеда „Війна з правдою”. Обговорення цієї книги проводилося на американському каналі телебачення C-SPAN2 23 і 31 липня 2005. Недавно я сам зустрічався з деякими чеченцями з Росії, що захоплювалися бен Ладеном і проживали тут безкоштовно на урядові субсидії, отримували тут інструкції, і були захищені американським урядом краще від звичайних американців. Продовжувати можна до безмежності.

Девід Рей Гріффін відхиляє офіційну теорію обвалу МТЦ як квапливо придуману і таку, що суперечить відомим фактам предмету обговорення. Дійсно, стаття Базанта і Zhou, у якій офіційна теорія була вперше опублікована, була прийнята до друку 13 вересня 2001. Я особисто не можу уявити, що таке важливе дослідження могло бути зроблене протягом одного дня. Доктора Базанта, що є знаменитим ученим, відомим з його робіт у галузі повзучості та руйнування бетону, імовірно, використовували, щоб

вести в оману і невірно спрямувати технічне співтовариство. Незважаючи на очевидні грубі помилки і прорахунки зазначені у наступних розділах (цієї праці – пер.), його теорію ніколи не критикували у науковому друці. Більше того, доктор Сандер з NIST використовуючи численні дослідницькі групи і необмежені ресурси, створив числову модель, що підтримує усі основні положення „теорії”. Усі зазначені вище факти обвалу так само як і сама пожежа у цій моделі, що описує обвал, зафіксований на кадрах, отриманих із камер спостереження зовні будинку, знову ігнорувалися. Звичайно, камери не могли зафіксувати розтріскування будинку безпосередньо перед обвалом.

На думку Девіда Рей Гріффіна американські урядові агенти, що діяли разом з бен Ладеном, використовуючи для своєї місії терористів, заздалегідь замінували дві вежі і сусідній 47-поверховий хмарочос вибухівкою, що була здетонована у якусь мить після аварій. David Ray Griffin вважає, що події 11 вересня, подібно до підпалу Рейхстагу в Німеччині в 1933 р., необхідні для тих урядових кіл, які розробили план американського правління на земній кулі у документі під назвою „Американське століття”, виданому ще в 1993 р. Вольфовіц, який є першим заступником Міністра оборони, був таємним керівником цього плану. Він розглядається як головна мозкова сила у війнах в Афганістані та Іраку. Дійсно, 11 вересня 2001 стало віхою, що ділить американську історію на до і після. Був створений міф, що деякі народи ненавидять американців і бажають знищити їх. Усі міжнародні права й угоди були порушені і почалася ера пріоритетних воєн, втручання і окупації. Американські збройні сили, поліція і розвідка отримали право розшукувати і затримувати кожного на Землі без обвинувачувального вироку та використовувати будь-які засоби, включаючи вільний доступ до фінансів, пошти, телефонних переговорів, приватного життя і т.д. аж до вбивства. Я безпосередньо двічі затримувався, – ймовірно через мою бороду, – а мій автомобіль обшукали на наявність вибухових речовин та зброї. Маямі перебуває під пильним спостереженням поліції, охорони та кінологів з собаками, що шукають запах вибухових речовин. Недавня спроба вбивства президента Венесуели Чавеса є ще одним прикладом. Війни в Афганістані й Іраку, що відповідно до „Американського століття” є першим кроком до контролю над аравійською та каспійською нафтою, розпочалися тільки після 11 вересня й усе ще тривають. Однак, військові витрати для набагато більшої війни у багато разів перевищують витрати на антитерористичну діяльність і військові витрати решти світу. Величезні фонди були задіяні для стратегічного озброєння, включаючи суперпроникаючі бомби, станції перехоплення, нове покоління субмарин і ядерних бомб, озброєння військових супутників, і т.д., і т.п. Нова гонитва озброєнь почалася з безпрецедентною швидкістю. Починаючи Іракську війну, Президент Буш попередив, що використання „ядерної зброї не зняте з порядку денного”. Без сумніву, вона би була використана щоб знищити Багдад, якщо б американські загони були переможені; а тому партизанська війна стала єдиним вибором для іракських патріотів. Хто особливо зацікавлений у війні або, більше того, у великій війні? Відповідь очевидна: „Ніхто” і „Немає

взагалі ніяких ворогів". Однак, у Сполучених Штатах є близько чотирьохсот мільярдів і чотири мільйони мільйонерів. Вони виконують головну місію США, яка звучить так: „Гроші – влада“. Їхня влада величезна, хоча прихована внаслідок суперництва, подібно до енергії нуклонів у ядрі. Вона примножена в багато разів шістдесятимільйонними арміями менших інвесторів, які підтримуються ЗМІ, збройними силами і 14 спецслужбами. Один американський мільярдер може створити свій уряд і контролювати таку країну як Естонія, Вірменія чи Грузія. Він не робить цього тільки тому, що він не бачить як збільшити завдяки цьому своє багатство – це поки що не є для нього доброю інвестицією. Втілена у корпораціях американська пристрасть до заробляння грошей (*оригінал money making – робити гроші*), створює величезну результуючу силу, якій не може протистояти жодна держава, країна або уряд. Ніхто не може перевершити їх у прибутковому бізнесі, заснованому на узаконених обмані та примусі. Подібно до спритного моряка, що може вести вітрильник проти вітру, ця сила може вести цю велику країну проти вітру етики, суспільної думки, побоювання ядерної війни і т.д. у будь-якому напрямі, де є запах грошей. Після падіння Радянського Союзу, коли система світу антигрошей зруйнувалася, долар через конвертовані валюти став власником цілого світу. США управляються не Президентом чи Конгресом, а Федеральним Резервом, що є приватною організацією мільярдерів.

Нижче доведено, що офіційна „теорія“ обвалу МТЦ побудована на помилкових припущеннях і прорахунках, і отже, невірна, а також запропоновано сумісне з усіма відомими фактами наукове пояснення.

2. Пусковий механізм: теплові напруження проти повзучості. „Втрата захисної теплової ізоляції сталевих колон протягом початкового вибуху пришвидшила нагрівання колон до дуже високої усталеної температури, набагато більшої за 800°C, що знизило межу текучості і спричинило втрату стійкості за умов повзучості більше ніж половини колон на критичному поверсі, тому верхня частина конструкції вище від цього поверху впала і величезним вертикальним динамічним навантаженням зруйнувала нижчу частину вежі; відбулася низка ударів і руйнувань протягом усього падіння вниз” – каже офіційна „теорія“, не звертаючи жодної уваги на теплові напруження і залишкові технологічні напруження, що виникають як результат прокатування, зварювання, збирання і т.д. Дивно, але „теорія“ ігнорує навіть головну подію – горіння розлитого палива на критичному поверсі, подію, що спричинила весь обвал.

Усі припущення і висновки цієї „теорії“ є помилковими. Спочатку утрата захисної теплової ізоляції у більш ніж половини з 260 колон критичного поверху внаслідок первісного вибуху є нічим іншим, як чудом, необхідним для „теорії“, оскільки для повзучості суттєвим є час. Згадавши, що проміжок часу між кожною катастрофою (літака – пер.) і обвалом становив близько однієї години, що є, звісно, дуже невеликою кількістю часу для впливу повзучості в сталевій колоні, яка на рівні напружень, принаймні, у три рази менша, ніж межа текучості і/або напруження, за яких втрачається стійкість, при нормальній температурі, через запас

міцності, навіть якщо повна бічна поверхня колони була піддана температурі 800°C протягом всього цього часу.

Швидкість поширення теплоти визначається тепловою проникністю, що дорівнює 12×10^{-6} м²/с для сталі і приблизно у п'ятдесят разів менша для захисної теплової ізоляції. Наскільки швидкий цей процес у вимірах часу? Давайте розглянемо точний приклад. Припустимо, що початкова температура сталевого півпростору є нульовою. Потрібна одна година, щоб збільшити температуру до 650°C на відстані 8 см від поверхні, на якій протягом усього часу підтримується температура 800°C. Для теплової ізоляції відповідна відстань дорівнює близько 1 см за тих самих крайових умов. Іншими словами, одна година є лише часом, необхідним для проникнення теплоти через захисну теплову ізоляцію несучої колони; потрібно ще одна година, щоб нагріти колону безпосередньо. Тобто для прояву повзучості зовсім немає часу.

По-друге, припущення, що температура чотириметрової утримувальної колони критичного поверху протягом пожежі становила 800°C, є досить фривольним. Давайте знову розглянемо приклад точного обчислення. Припустимо, що паливо з н-октану спалюється за сталого тиску в адіабатній камері згоряння двигуна літака з 40%-им надлишком повітря; паливо вводиться в камеру згоряння при 25°C, у той час як повітря від компресора входить у цю камеру згоряння під тиском 600 кПа і за температури 300°C. Можна обчислити, що продукти згоряння залишають камеру згоряння і надходять до турбіни з температурою 769°C, так що середня температура лопаток турбіни значно нижча за 700°C. Це є реальні умови згоряння палива в двигунах Боїнгів, що врізалися у вежі.

Давайте порівняємо згоряння палива, розлитого на критичному поверсі вежі МТЦ, зі згорянням цього ж палива в двигуні Боїнга. Камерою згоряння вважатимемо цілий поверх, відкритий до доступу повітря простір з рідким паливним шаром на підлозі. Повітря входить у цю камеру згоряння з атмосфери під тиском 100 кПа і за температури 25°C. Порівняємо температуру лопаток турбіни Боїнга із відповідними значеннями для теплоізованих колон поверху. Перебіг згоряння в двигуні відбувається за ідеальних умов однорідного перемішування в однорідній суміші, розробленій для досягнення настільки високої температури продуктів згоряння, наскільки це можливо. Згоряння на відкритому, неадіабатному поверсі є, очевидно, неповним і далеким від стехіометричного балансу, – з холодним повітрям і низьким повітряно-паливним відношенням, з реакцією, що перебігає в конвективному вогнищі, яке забезпечує дуже неоднорідний розподіл температур в просторі і часі. Наприклад, температура вершини конвективного полум'я свічки може досягти 500°C, але Ви можете провести у ньому пальцем, оскільки середня температура полум'я є нижчою за 100°C. Отже, середня температура в палаючому оточенні несучих колон була ймовірно нижчою за 500°C, у той час як у локальному вимірі у деяких плямах близько до стелі поверху, вона могла досягти 1000°C і вище через високі адіабатні температури полум'я

палива. Для втрати стійкості за умов повзучості, насправді, ціла колона повинна перебувати під дією високої температури протягом тривалого часу.

По-третє, зменшення межі текучості сталі було занадто малим, щоб відіграти яку-небудь роль при обвалі. Фасонний гарячий прокат, використаний у колонах, має межу текучості, що становить приблизно 600 МПа, а межа міцності складає близько 900 МПа за 20°C. При 800°C ці значення на 10–20 % нижчі, у той час як номінальні напруження в колонах були, принаймні, утричі меншими за таку межу текучості.

Із цього аналізу пожежі випливає, що висновки „теорії” про втрату стійкості за умов повзучості є необґрунтованими. Помітна повзучість конструкцій із аустенітової сталі починається приблизно від 540°C. Тим часом, ця і більш високі температури могли бути досягнуті тільки в окремих місцях, у верхніх частинах деяких несучих колон, де температура полум'я була максимальною. А через тепловий захист, ці температури могли підтримуватися протягом часу, набагато меншого від одної години.

Для „теорії” істотним є те, щоб кожна утримувальна колона палаючого поверху була нагрітою від основи до вершини до однієї і тієї ж найвищої температури і підтримувалася при ній протягом тривалого часу, оскільки у випадку однорідного нагрівання всіх колон не виникає жодних теплових напружень у колонах, тобто, щоб тепловими напруженнями можна було знехтувати. Якщо тільки декотрі з колон є нагрітими, то у них виникають теплові напруження, що можуть досягти рівня αET , де α – коефіцієнт теплового розширення; E – модуль Юнга; T – температура. Для сталі $\alpha = 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, а $E = 200$ ГПа, отже, за температури 800°C теплові напруження могли би бути надзвичайно високими (на рівні 2 ГПа), що приблизно в чотири рази більше за межу текучості сталі за 800°C, тобто це, звичайно, нереально.

Обчислення просторово-часового розподілу температури і теплових напружень у будинку за реальних умов пожежі є тонкою процедурою, яка відповідальна за забезпечення правильного передбачення або пояснення заключного результату. Чи зруйнується, чи залишиться будинок цілим залежить від розподілу теплових напружень. Будь-який матеріальний об'єм конструкції розірве на шматки тепловими напруженнями, якщо деяка частина конструкції нагрівається до високої температури занадто швидко. Тому числова модель обвалу повинна включати як найважливіші складові випаровування рідкого паливного шару, газову динаміку реагуючої суміші на критичному поверсі, теплообмін і поширення температури й теплових напружень у будинку. Така модель не була досі зроблена.

Тільки задля грубої оцінки виконаємо деякі обчислення, використовуючи поняття „гарячої плями” всередині будинку. Несучі колони у гарячій плямі нагріваються до однієї і тої ж температури T , у той час як несучі колони поза гарячою плямою зберігають початкову температуру $T = 0$. Отже, теплові напруження в гарячих колонах є стискаючими, у той час як у холодних колонах вони розтягуючі. У випадку пожежі у вежах МТЦ і суміжному 47-поверховому будинку центральні колони були ймовірно в гарячій плямі, у той час як, принаймні, деякі утримувальні колони

зовнішнього каркасу, охолоджені атмосферним повітрям, були поза гарячою плямою. Стискаючи теплові напруження, будучи сприйнятими тільки згином стропильних ферм поверху і холодними колонами зовнішнього каркасу, проникли далеко вглиб холодних колон основної конструкції. В сумі із гравітаційними і залишковими технологічними напруженнями стиску, теплові напруження в будинку створили теплову бомбу, подібну до „батовської сльози“, що зумовило зародження хвилі руйнування, яка роздробила цілу вежу менше ніж за 0,1 с.

Варто нагадати, що так звана „батовська сльоза“, тобто тільки-но вийнята зі скляної ванни маса скла у формі сльозини і відразу оброблена фторидною кислотою для видалення поверхневого шару з тріщинами, містить ядро, що перебуває під дією високих стискувальних напружень, і має бездоганний поверхневий шар з високими розтягувальними напруженнями близько 5 ГПа. Відламування від „батовської сльози“ її малюсінкового хвостика звільнює пружну енергію стискувальних напружень у вигляді хвилі руйнування, що поширюється зі швидкістю звуку і розпорошує скло на шматочки мікронних розмірів. (див. додаток 1) Принагідно варто нагадати, що залишкові напруження стиску від вальцювання сталевих колон можуть досягати половини або й більше від межі текучості. Розглянемо детально те, що сталося під час пожежі на критичному поверсі. Пара розлитого на підлозі поверху рідкого палива змішалася з атмосферним киснем поверху, і випадкове займання спричинило екзотермічну реакцію суміші так, що базуючись на вищезгаданому обчисленні процесу згоряння, температура і тиск продуктів згоряння на поверсі могла досягти до 750 °C і 400 кПа. Ця стадія вибуху тривала декілька секунд. Тиск газу не зміг би розірвати навіть одягу когонебудь в епіцентрі, не кажучи вже про захисну теплову ізоляцію сталевих колон. Але, тиск вибив усі вікна і зробив поверх відкритим для атмосфери. Порівняно стійка стадія пожежі тривала близько однієї години. На цій стадії холодне повітря від зовнішнього кисневого постачання, необхідного для горіння, заходило по підлозі поверху, у той час як гарячі продукти згоряння виходили попід стелею поверху. Тиск газу на поверсі на цій стадії становив близько 100 кПа, як і зовні. Згоряння відбувалося у конвективному вогні, низ якого мав температуру випаровування палива, тобто меншу, ніж 100 °C, у той час як середня температура на вершині вогню біля стелі могла, звичайно, сягати 800 °C і більших значень через високу адіабатну температуру полум'я октану. Лінійне наближення каже, що верхня частина колони завдовжки близько одного метра перебувала під впливом температури 550 °C і вище. Найпершими напевне сприйняли теплове розширення і втрату стійкості від теплових напружень довгі горизонтальні стропильні ферми на стелі критичного поверху. Повзучість і розм'якшення бетону на цій стелі, разом із втратою стійкості стропильних ферм, протягом пожежі значно зменшили підтримку верхніх кінців гарячих несучих колон на критичному поверсі. Для демонстрації впливу теплових напружень засобами моделі „гарячої плями“ припустимо, що підлога критичного поверху і холодна стеля наступного верхнього поверху тверді, у той час як стеля критичного поверху зм'якшується протягом пожежі. Припустимо

також, що всі гарячі колони є пружними аж до втрати стійкості, а всі холодні колони є пружними аж до руйнування розтягу.

Позначимо через S_A площу поперечного перерізу всіх несучих колон критичного поверху. Припустимо, що βS_A – площа поперечного перерізу гарячих несучих колон, нагрітих до температури T , а $(1 - \beta)S_A$ – площа поперечного перерізу холодних несучих колон при температурі $T = 0$. У результаті гарячі колони знаходяться під дією стискаючих теплових напружень

$$\sigma = -\delta(1 - \beta)\alpha ET, \quad \text{де } 0 < \beta < 1, \quad 1/2 < \delta < 1, \quad (1)$$

у той час як холодні колони знаходяться під дією розтягуючих теплових напружень

$$\sigma = \delta\beta\alpha ET, \quad \text{де } 0 < \beta < 1, \quad 1/2 < \delta < 1. \quad (2)$$

Коефіцієнт δ враховує пружну реакцію верхніх кінців колон. Для твердих стропильних ферм поверху $\delta = 1$, а для дуже м'яких ферм перекриття поверху, коли пружна реакція основи створюється колонами безпосередньо, $\delta = 0,5$. Отже, гарячі колони знаходяться під дією суми стискаючих гравітаційних і теплових напружень, у той час як холодні колони будуть розвантажені тепловими напруженнями. У цій ілюстративній оцінці ми знехтували залишковими напруженнями.

Обвал може початися або з руйнування внаслідок розтягу холодних колон, або із втрати стійкості гарячими колонами на критичному поверхсі. Оцінимо критичний розмір гарячої плями для обох випадків.

Припустимо, що втрата стійкості гарячих колон відбувається при $\beta = \beta_b$ і що $-f\sigma_Y$ – номінальні напруження у всіх колонах поверху, зумовлені вагою верхньої конструкції; тут f – запас міцності, а σ_Y – межа текучості для сталі. Нехай $-f_b\sigma_Y$ – напруження в гарячих колонах, за яких втрачається стійкість; очевидно, що $f_b \geq f$. Звідси і з рівняння (1) випливає, що

$$f\sigma_Y + \delta(1 - \beta_b)\alpha ET = f_b\sigma_Y, \quad (3)$$

а отже,

$$\beta_b = 1 - \frac{(f_b - f)\sigma_Y}{\delta\alpha ET}. \quad (4)$$

Тепер припустимо, що руйнування холодних колон під дією розтягуючих напружень відбувається за $\beta = \beta_T$. Звідси і з рівняння (2) випливає, що

$$\delta\beta_T\alpha ET - f\sigma_Y = \sigma_b, \quad (5)$$

отже,

$$\beta_T = \frac{\sigma_b + f\sigma_Y}{\delta\alpha ET}, \quad (6)$$

де σ_b – межа міцності на розрив для конструкційної сталі. Запишемо відношення β_b/β_T із рівнянь (4) та (6)

$$\frac{\beta_b}{\beta_T} = \frac{\delta\alpha ET - f_0\sigma_Y + f\sigma_Y}{\sigma_b + f\sigma_Y}. \quad (7)$$

Із рівняння (7) випливає, що

$$\frac{\beta_b}{\beta_T} > 1 \quad \text{оскільки} \quad \delta\alpha ET > \sigma_b + f_0\sigma_Y. \quad (8)$$

Наприклад, за типових значень, коли $\alpha ET = 2$ ГПа, $\sigma_Y = 0,5$ ГПа, $\sigma_b = 0,7$ ГПа, $f_0 = 0,5$, $f = 0,25$, а $\delta = 0,75$, отримуємо, що $\beta_b/\beta_T = 5/3$.

Це означає, що обвал почався з руйнування холодних колон унаслідок розтягу, оскільки критичний розмір гарячої плями за цього сценарію менший, ніж за сценарію втрати стійкості гарячих колон. Гаряча пляма, очевидно, розширювалася протягом пожежі.

Отже, руйнування холодних колон критичного поверху відіграло роль малюсінкового хвостика „батовської сльози“, що відламавшись розпорошується на маленькі фрагменти усю сльозину. Руйнування холодних колон критичного поверху ініціювало процес звільнення пружної енергії стискаючих напружень, що спричинили до появи хвилі руйнування, оскільки тільки хвиля руйнування може так швидко розпорошити матеріал на дрібні фрагменти.

3. **Динаміка: точний аналіз проти наближеного.** Відповідно до „теорії“, верхня частина вежі вище від критичного поверху вільно падала на початку обвалу і створювала „величезні“ динамічні напруження в несучих колонах основної конструкції, так, що максимальні динамічні напруження були в 64,5 разів більшими за номінальні статичні напруження в цих колонах від ваги верхньої конструкції. „Ця оцінка розрахована за рівнянням пружних хвиль“ – так стверджує „теорія“.

Давайте перевіримо ці обчислення. Припустимо, що маса m падає під дією гравітаційних сил і вдаряється об кінець вертикальної пружної колони (стрижня) зі швидкістю V_0 і прилипає до цього кінця. Легко знайти швидкість v_x та напруження σ_x у внутрішніх точках колони (стрижня), що є результатом цього удару:

$$v_x = \frac{mg}{SE}c + \left(V_0 - \frac{mg}{SE}c\right) \exp\left[\frac{SE}{mc^2}(x - ct)\right], \quad (9)$$

$$\sigma_x = -\frac{mg}{S} + \left(-\frac{V_0}{c}E + \frac{mg}{S}\right) \exp\left[\frac{SE}{mc^2}(x - ct)\right]. \quad (10)$$

Тут $0 < x < ct$; t – час з моменту удару $t = 0$; x – координата уздовж осі стрижня, розміщена за $x > 0$; E – модуль пружності; c – швидкість поширення пружних хвиль у колоні, що дорівнює $\sqrt{E/\rho}$, де ρ – густина

матеріалу; S – площа поперечного перерізу колон. Для $x > ct > 0$ і σ_x , і v_x дорівнюють нулю.

Зокрема на кінці колони при $x = 0$ і $t > 0$ напруження та швидкість дорівнюють

$$\sigma_x = -\frac{mg}{S} + \left(-\frac{V_0}{c}E + \frac{mg}{S}\right) \exp\left[-\frac{SE}{mc}t\right], \quad (11)$$

$$v_x = \frac{mg}{SE}c + \left(V_0 - \frac{mg}{SE}c\right) \exp\left[-\frac{SE}{mc}t\right]. \quad (12)$$

Максимальні напруження дорівнюють

$$\sigma_x = -\frac{V_0}{c}E \quad \text{за} \quad x = 0, \quad t = 0. \quad (13)$$

Якщо взяти до уваги припущення „теорії” про вільне падіння верхньої конструкції, то тоді $V_0 = \sqrt{2gh} = 8,5$ м/с, оскільки висота поверху $h = 3,7$ м, а $g = 9,8$ м/с². Для сталеві колони $c = 5,1$ км/с, а $E = 200$ ГПа, отже, відповідно до рівняння (13) максимальні напруження в колонах основної конструкції дорівнювали би 340 МПа. Виходячи із зазначеної оцінки „теорії”, номінальні статичні напруження в цих колонах, тобто mg/S , повинні були б дорівнювати 340/64,5=5 МПа, що в сто разів менше від межі текучості для сталі. Це неправдоподібно! Навіть дівчинка-підліток може створити такий тиск на підлогу своїми високими підборами. Наближена оцінка „теорії” дуже неточна.

Однак, навіть дуже перебільшені внаслідок припущення вільного падіння максимальні напруження у 340 МПа від удару є приблизно в шість разів меншими, ніж максимальні теплові напруження у 2 ГПа. Отже, роль динамічного перевантаження від удару верхньої частини конструкції, виявляється вторинною у порівнянні з тепловими напруженнями. Динамічні напруження могли зробити внесок у стискувальні теплові напруження основних колон, щоб взаємно створити хвилю руйнування, якщо, звичайно, ці колони не були роздроблені хвилею руйнування раніше. Час вільного падіння верхньої конструкції із висоти $h = 3,7$ м дорівнює $\sqrt{2h/g} = 0,75$ с, що набагато більше за час 0,05 с, необхідний для розтріскування цілого будинку хвилею руйнування, якщо, звичайно, вона була створена зразу ж після руйнування холодних колон внаслідок розтягу.

Між іншим, автори „теорії” зробили припущення про те, що максимальні динамічні напруження будуть поширюватися вниз зі швидкістю 5 км/с, і що хвиля руйнування повинна виникнути зразу ж за хвилею ударного стиску, оскільки жоден матеріал не зміг би витримати „величезні” напруження стиску, що були, відповідно до „теорії”, у 64,5 разів більші за статичні напруження. Отже, „теорія” таки підтримує механізм обвалу внаслідок хвилі руйнування, а не механізм поступового руйнування. Але те, що сталося, є набагато складнішим від того, що має на увазі „теорія”.

На підставі поданих обчислень динамічного перевантаження є безперечно очевидним те, що саме теплові, а не динамічні напруження спричинили обвал сусідньої 47-поверхової вежі. Частина розлитого палива потрапила на дах цього будинку і зумовила там пожежу. Не було ніякої верхньої конструкції, яка би могла впасти і почати обвал, як цього вимагає „теорії”. У цьому випадку тільки теплові напруження могли спричинити хвилю руйнування.

4. Вільне падіння: хвиля руйнування проти поступового руйнування. Щоб пояснити обвал у режимі вільного падіння, „теорія” припускає, що в будь-який момент обвалу існують верхня частина вежі, що рухається вниз, а також основна конструкція, що залишається неушкодженою, і що основна конструкція не чинить жодної реакції та опору падаючій зверху частині, оскільки „розсіювання непружної енергії у пластичних шарнірах колон, що обвалюються, є набагато меншим за кінетичну енергію падаючої маси”.

Ця теза є очевидно грубою помилкою. Утрата кінетичної енергії падаючої маси зумовлена головно пружною деформацією основної конструкції, а опір твердотільної конструкції спричинений головно пружною реакцією, що може зупинити падаючу масу, навіть якщо розсіювання непружної енергії дорівнює нулю. Наприклад, „величезне” динамічне перевантаження від удару верхньої конструкції на критичному поверсі, що є відповідно до „теорії” у 64,5 разів більшим за статичне навантаження, відповідно до закону Ньютона має також бути прикладеним до рухомої маси, створюючи силу опору, що повністю відкидається відповідно до „теорії”.

Навіть у межах моделі про поступове руйнування, розсіювання непружної енергії було розраховане невірно. Дійсно, енергія, розсіяна в пластичних шарнірах колон, що втратили стійкість, приблизно в 8,4 рази менша за зменшення гравітаційної енергії верхньої частини конструкції, що падає з критичного поверху. Однак, така оцінка дійсна за урахування тільки одного пластичного шарніра на кожну колону одного поверху, що суперечить таким фактам. По-перше, динамічна нестійкість колон (стрижнів) відбувається за більш високого порядку мод втрати стійкості (чим більше динамічне навантаження, тим вища мода втрати стійкості). По-друге, (за одного пластичного шарніру – ред.) руїни повинні складатися з уламків колон, завдовжки два метри що є дуже далеким від дійсності. Якщо взяти до уваги три пластичні шарніри на кожну колону одного поверху, то такі ж обчислення дають відношення 2,8, а не 8,4. У цьому випадку руїни склалися би з уламків колон, завдовжки один метр, що ближче до дійсності. Будь-яке точне обчислення засвідчує те, що розсіювання непружної енергії протягом обвалу істотно і порівняне зі зменшенням потенціальної енергії і значенням відповідної кінетичної енергії.

Проаналізуємо модель „поступового руйнування” виключивши помилки „теорії”. Припустимо, що всі колони критичного поверху одночасно зникли, і верхня конструкція вільно впала на основну конструкцію, як це пропонується в „теорії”. Із точного розв’язку з розділу 3 випливає, що максимальні повні напруження в колонах основної конструкції внаслідок удару дорівнюють 340 МПа, що є майже вдвічі менше за межу текучості

для сталі. Це значення повинно бути близьким до напружень втрати стійкості з урахуванням запасу міцності добре спроектованих колон. З огляду на те, що 340 МПа – дуже перебільшена відповідно до припущення про вільне падіння оцінка, і що такі максимальні значення напружень залишаються на цьому рівні протягом досить короткого часу, набагато меншого за 0,01 с, то є сумнівним, що цей уявний удар міг зумовити загальне руйнування або втрату стійкості колон основної конструкції. Руйнування внаслідок втрати стійкості могло бути можливим тільки у випадку дуже гнучких колон дуже поганого проекту, оскільки напруження втрати стійкості за динамічного навантаження навіть для гнучких колон набагато більші від відповідних напружень за статичного навантаження внаслідок вищих мод втрати стійкості.

Отже, поступове руйнування є нічим іншим як результатом прорахунків „теорії”.

Єдиним можливим науковим поясненням обвалу в режимі вільного падіння є те, що будинки були роздроблені хвилями руйнування на початку обвалу кожної споруди упродовж приблизно 0,05 с, оскільки хвилі руйнування поширюються у сталі, склі, бетоні, а також мармурі зі швидкістю приблизно 6 км/с. Розтріскування протягом такого короткого проміжку часу є непомітним, оскільки об’єм тріщин є дуже малим у порівнянні з об’ємом неушкодженого матеріалу, який увесь цей час не зазнає видимих деформацій. Розтріскування вежі за 0,05 с спричинило акустичну емісію, яку було чути як вибух. Гучний глухий шум було би чути тоді, коли розтріскування, як це стверджує „теорія” поступового руйнування, тривало б 10 с. Для того, щоб поширилася хвиля руйнування, необхідно щоб матеріал був навантажений стискаючими напруженнями високої енергії, оскільки ця енергія звільняється хвилею руйнування. (див. додаток 1).

Швидкість фрагментів після хвилі руйнування складає порядку 10–100 м/с залежно від матеріалу і напружень; для скла вона приблизно в чотири рази більша, ніж для сталі. Розмір фрагментів після хвилі руйнування залежить від напружень і матеріалу; для сталі він дорівнює приблизно від 5 до 50 см, а для скла, бетону і мармуру – від 0,1 до 10 мкм. Поєднання вільного падіння важких сталевих фрагментів під дією сил тяжіння і вибухового розкидання частинок скла, бетону і мармуру у формі хмар пилу створили картину обвалу, яку можна було бачити на телеекранах.

Класичним прикладом дії хвилі руйнування є згадувана скляна „батовська сльоза”. Якщо відламується її малесенький хвостик, то вона гучно вибухає і перетворюється на хмару пилу. Потрібно 10^{-5} с щоб розпорошити хвилею руйнування п’ятисантиметрову „сльозину”, і 10^{-2} с щоб створити однометрову хмару скляних частинок мікронних розмірів.

Отже, механізм обвалів МТЦ та сусіднього 47-поверхового будинку внаслідок хвилі руйнування підтримується такими фактами:

- (i) усі будинки зруйнувалися у режимі вільного падіння;
- (ii) кожен обвал супроводжувався звуком вибуху;

(iii) розміри сталевих фрагментів і частинок пилу зі скла, бетону і мармуру відповідають розрахованим за теорією хвиль руйнування;

(iv) створивши хмари, частинки пилу поширилися на декілька сотень метрів.

5. **Хвиля руйнування проти ударної хвилі.** Звернемо увагу на основні властивості ударних хвиль та хвиль руйнування услід за [2]. Обидві хвилі є деякими фронтами неоднорідності густини, швидкості, і напружень у матеріалі.

Ударні хвилі спричиняються ударами, а також вибухами у газах, рідинах і твердих тілах. Густина матеріалу позаду ударної хвилі завжди більша, ніж на фронті хвилі. Максимальні стискні напруження позаду ударної хвилі завжди більші, ніж перед нею. Нормальна швидкість ударної хвилі завжди більша від швидкості звуку (у твердих тілах і рідинах незначно більша). Товщина фронту ударної хвилі визначається в'язкістю матеріалу.

Існує розповсюджене, але невірне переконання, що ударна хвиля може роздрібнити матеріал на маленькі фрагменти². Роздрібнити означає розділити тріщинами на малі фрагменти, але ударна хвиля не може вкрити тріщинами тіло, оскільки будь-яке тріщиноутворення супроводжується розширенням тіла. Хвиля руйнування повинна завжди йти за ударною хвилею, щоб роздрібнити матеріал.

Хвилі руйнування можуть бути зумовлені в тілах тільки стискувальними напруженнями. Хвиля руйнування розмежовує неушкоджений матеріал перед хвилею від роздрібненого матеріалу позаду хвилі. Товщина фронту хвилі руйнування має порядок розміру фрагментів матеріалу позаду хвилі. Середня густина матеріалу, максимальні стискні напруження за хвилею руйнування завжди менші, ніж перед нею. Нормальна швидкість усталених хвиль руйнування дорівнює швидкості звуку (поздовжня пружна хвиля). Для неусталених хвиль руйнування, нормальна швидкість менша від швидкості звуку і визначається із розв'язку конкретної задачі, тобто залежить від крайових і початкових умов.

6. **Висновки.** З'ясовано, що під час трагічного обвалу 11 вересня 2001:

(i) повзучість не відіграла жодної ролі, а обвал спричинили теплові напруження;

(ii) обвал зумовило руйнування унаслідок розтягу під дією теплових напружень декількох не нагрітих утримувальних колон, а не втрата стійкості за умов повзучості гарячих колон;

(iii) динамічні напруження від удару верхньої конструкції на початковій стадії обвалу кожної будівлі були недостатніми навіть для того, щоб спричинити руйнування нижніх конструкцій, не кажучи вже про поступове руйнування цілих будинків;

(iv) породжена після руйнування внаслідок розтягу невеликої кількості не нагрітих колон критичного поверху хвиля руйнування роздробила кожен будинок приблизно за 0,05 с і утворила звук вибуху, а сталеві фрагменти

² Доктор Базант та багато анонімних рецензентів дотримувалися цієї думки.

вільно падали, у той час як скло, бетонні та мармурові фрагменти утворили хмари пилу.

Механізм хвилі руйнування є найімовірнішою гіпотезою, оскільки він підтримується фактами предмета обговорення та уточненими обчисленнями. Однак, строгі умови, що зумовлюють хвилі руйнування повинні бути вивчені, що є важливою задачею на майбутнє.

Подяки. Автор вдячний редакторам і анонімним рецензентам технічних журналів, які відхилили пояснення автора через їхню суперечність офіційній „теорії”. Їхні коментарі стимулювали автора до поданого тут аналізу „теорії”, котрій все ще так глибоко довіряють.

1. Bazant Z.P., Zhou Y. Why did the World Trade Center collapse? – Simple analysis // J. Engineering Mechanics, 2002. – Vol. 128. – No. 1. – P. 1–6.
2. Cherepanov G.P. Mechanics of Brittle Fracture. – New York: McGraw-Hill, 1979. – 980 p. (Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.)

Додаток 1. Теорія хвиль руйнування

Хвиля руйнування є фронтом неоднорідності масової густини, матеріальних швидкості і напружень, що відокремлює неушкоджений матеріал перед хвилею руйнування від роздробленого позаду неї. Густина матеріалу позаду фронту хвилі руйнування завжди менша, ніж перед хвилею, оскільки будь-яке розтріскування в тілі розширює його. Товщина фронту хвилі руйнування має порядок розміру фрагментів роздробленого матеріалу позаду нього.

Закопи збереження для хвилі руйнування можна подати таким чином: збереження маси

$$\rho_0 (\mathbf{V} - \mathbf{v}_0) = \rho_F (\mathbf{V} - \mathbf{v}_F), \quad (\text{Д.1})$$

збереження кількості руху

$$-\sigma_0 + \rho_0 (\mathbf{V} - \mathbf{v}_0)^2 = -\sigma_F + \rho_F (\mathbf{V} - \mathbf{v}_F)^2, \quad (\text{Д.2})$$

збереження енергії

$$\frac{1}{2}(\mathbf{V} - \mathbf{v}_0)^2 + \frac{U_0}{\rho_0} - \frac{\sigma_0}{\rho_0} = \frac{1}{2}(\mathbf{V} - \mathbf{v}_F)^2 + \frac{U_F}{\rho_F} - \frac{\sigma_F}{\rho_F} + \frac{D}{\rho_F}. \quad (\text{Д.3})$$

Тут індексом „0” позначено величини, що відповідають неушкодженому матеріалу перед хвилею руйнування, а індексом „F” – зруйнованому матеріалу позаду хвилі руйнування; \mathbf{V} – нормальна швидкість фронту хвилі руйнування; \mathbf{v} – швидкість точок матеріалу, нормальна до фронту руйнування; ρ – густина матеріалу; U – об’ємна густина пружної енергії матеріалу; σ – нормальна до фронту руйнування компонента напружень; D – об’ємна густина поверхневої енергії зруйнованого матеріалу.

Рівняння (Д.1) і (Д.3) можна переписати таким чином:

$$\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_F} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_0}{\mathbf{V} - \mathbf{V}_0} \quad (\text{Д.4})$$

$$\sigma_0 - \sigma_F = \rho_0 (\mathbf{V} - \mathbf{v}_0) (\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_0), \quad (\text{Д.5})$$

$$\frac{\mathbf{D}}{\rho_F} = \frac{\mathbf{U}_0}{\rho_0} - \frac{\mathbf{U}_F}{\rho_F} + \frac{1}{2} (\sigma_0 + \sigma_F) \left(\frac{1}{\rho_F} - \frac{1}{\rho_0} \right). \quad (\text{Д.6})$$

Припустимо, що неушкоджений матеріал знаходиться у стані спокою, тобто, $\mathbf{v}_0 = \mathbf{0}$. Тоді значення ρ_F , \mathbf{v}_F та \mathbf{D} можна знайти з рівнянь (Д.4)-(Д.6) наступним чином:

$$\rho_F = \frac{\rho_0}{1 - \frac{\sigma_0 - \sigma_F}{\rho_0 \mathbf{V}^2}}, \quad (\text{Д.7})$$

$$\mathbf{v}_F = \frac{\sigma_0 - \sigma_F}{\rho_0 \mathbf{V}}, \quad (\text{Д.8})$$

$$\mathbf{D} = \frac{\rho_F}{\rho_0} \left(\mathbf{U}_0 - \frac{\sigma_0^2 - \sigma_F^2}{2\rho_0 \mathbf{V}^2} \right) - \mathbf{U}_F. \quad (\text{Д.9})$$

Із рівнянь (Д.7) та (Д.8) випливає, що оскільки внаслідок фізичних міркувань про хвилі руйнування $\rho_0 > \rho_F$, то $\mathbf{v}_F < \mathbf{0}$ і $\sigma_0 < \mathbf{0}$. Це означає що хвиля руйнування може рухатися тільки у стиснутому матеріалі, а швидкість руху зруйнованого матеріалу завжди протилежна до напрямку нормальної складової швидкості хвилі руйнування.

Обмежимося тут лише розглядом усталених хвиль руйнування. Припустимо, що $\mathbf{V} < \mathbf{c}$, де \mathbf{c} – швидкість руху поздовжніх пружних хвиль у матеріалі. Пружна поле, що передує такій хвилі руйнування також буде усталеним. Однак, з рівнянь теорії пружності випливає, що усталене пружне поле може поширюватися тільки зі швидкістю \mathbf{c} . (Хвилі зсуву за таких обставин, очевидно, неможливі). Це означає, що припущення невірне, отже, $\mathbf{V} > \mathbf{c}$ для усталених хвиль руйнування. Із рівняння (Д.7) випливає, що ρ_F є дуже близьким до ρ_0 , тобто $\rho_F \approx \rho_0$, оскільки $\sigma_0 = \mathbf{E}$, а $\rho_0 \mathbf{V}^2 \geq \rho_0 \mathbf{c}^2 \approx \mathbf{E}$. Отже, рівняння (Д.9) запишеться так:

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}_0 - \frac{\sigma_0^2}{2\rho_0 \mathbf{V}^2} - \left(\mathbf{U}_F - \frac{\sigma_F^2}{2\rho_0 \mathbf{V}^2} \right). \quad (\text{Д.10})$$

Знехтуємо взаємним контактом фрагментів зруйнованого матеріалу унаслідок втрати взаємозв'язку, тобто вважатимемо, що $\sigma_0 = \sigma_F$ і $\mathbf{U}_0 = \mathbf{U}_F$. Тоді рівняння (Д.8) та (Д.10) набудуть вигляду

$$\mathbf{v}_F = \frac{\sigma_0}{\rho_0 \mathbf{V}}, \quad \mathbf{D} = \mathbf{U}_0 - \frac{\sigma_0^2}{2\rho_0 \mathbf{V}^2}. \quad (\text{Д.11})$$

Дослідимо D як функцію від V . Виходячи із принципу мінімуму поверхневої енергії величина D повинна бути мінімально можливою, оскільки D є поверхневою енергією одиниці об'єму зруйнованого матеріалу. Із цього принципу випливає, що $V = c$, оскільки D мінімальне за $V = c$. У 1967 р. автор разом із Л. Галіном дійшов цього ж висновку виходячи з аналогії між хвилею руйнування та вибуховою хвилею тринітротолуолу (гіпотеза Чапмена-Жуге).

Отже, основні рівняння усталених хвиль руйнування можна сукупно подати так:

$$V = c, \quad D = U_0 - \frac{\sigma_0^2}{2\rho_0 c^2}, \quad v_F = \frac{\sigma_0}{\rho_0 c}, \quad \rho_F \approx \rho_0. \quad (Д.12)$$

Ці рівняння виконуються для будь-яких анізотропних квазікрихких матеріалів, розміри яких набагато більші за товщину фронту хвилі руйнування, тобто за розміри фрагментів зруйнованого після проходження хвилі матеріалу. Використовуючи визначену експериментально із дослідів механіки руйнування ефективну поверхневу енергію Γ розтріскування матеріалу, можна оцінити розміри фрагментів зруйнованого матеріалу в термінах Γ та D .

Якщо, наприклад, вважати, що фрагменти є однаковими кубиками з ребром d , то можна обчислити

$$d = 12 \frac{\Gamma}{D}, \quad (Д.13)$$

а якщо фрагменти є довгими однаковими голками шестикутного поперечного перерізу з ребром r , то

$$2r = \frac{8}{\sqrt{3}} \frac{\Gamma}{D}. \quad (Д.14)$$

Така голчата форма фрагментів спостерігалася в деяких експериментах зі скляними зразками.

Припустимо, що ізотропний матеріал перебуває у стані гідростатичного тиску напруженнями σ_0 на фронті хвилі руйнування. У цьому випадку

$$U_0 = \frac{3(1-2\nu)}{2} \frac{\sigma_0^2}{E}, \quad \rho_0 c^2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (Д.15)$$

Тут E і ν – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. Підставивши рівняння (Д.12) в (Д.15), отримаємо такі результати для силікатного скла при $\Gamma = 2$ Н/м, $\rho_0 = 2,4$ г/см³, $E = 7 \times 10^4$ Н/мм², а $\nu = 0,17$:

$V = c = 5950$ м/с і

при $\sigma_0 = -500$ Н/мм²: $v_F = -35$ м/с, $D = 1,9$ Н/мм², $d = 12,8$ мкм, $2r = 5$ мкм;

при $\sigma_0 = -1$ кН/мм²: $v_F = -70$ м/с, $D = 7,5$ Н/мм², $d = 3,2$ мкм,
 $2r = 1,2$ мкм;

при $\sigma_0 = -5$ кН/мм²: $v_F = -350$ м/с, $D = 187,5$ Н/мм², $d = 0,1$ мкм,
 $2r = 0,05$ мкм;

Скляні голки, для яких параметр $2r$ перебував у діапазоні приблизно від 1 мкм до 10 мкм, спостерігалися експериментально [2]. Для каменю та будівельних матеріалів, таких як бетон, мармур та дерево, значення v_F , D , d та r порівняльні із відповідними значеннями для скла, оскільки їхня поверхнева енергія Γ порівняльна із енергією для скла.

Відповідно до цих обчислень пил, утворений внаслідок обвалу трьох будинків 11 вересня 2001, складався із фрагментів мікронних розмірів скла, бетону і мармуру, оскільки товщина фронту хвиль руйнування у цих матеріалах була набагато меншою від будь-якого розміру конструкції.

Припустимо тепер, що хвиля руйнування поширюється у сталевій колоні між стелею і підлогою поверху. Припустимо, що колона є твердотілим, вертикальним, круглим циліндром і що сталеві фрагменти за хвилею руйнування будуть деякими сегментами колони, розтріснутої уздовж площинок ковзання, нахилених під кутом 45° до осі циліндра. У цьому випадку висота сегмента h_s має дорівнювати

$$h_s = 2\sqrt{2} \frac{\Gamma}{D}, \quad (Д.16)$$

а

$$U_0 = \frac{\sigma_0^2}{2E}, \quad \rho_0 c^2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (Д.17)$$

Тут σ_0 є середнім значенням напружень стиску у неушкодженому сегменті перед хвилею руйнування, спричинених гравітаційним, тепловим і технологічним навантаженнями (наприклад, від вальцювання, зварювання і збирання). Хвиля руйнування, що звільнює потенціальну енергію напружень стиску випереджає групову швидкість $\sqrt{E/\rho_0}$ так, що на відстані 4 м (висоти колони) вона випереджає її приблизно на 0,3 м.

Використовуючи рівняння (Д.12), (Д.16) та (Д.17), можна знайти для сталі ($\Gamma = 20$ кН/м, $\rho_0 = 7,9$ г/см³, $E = 200$ ГПа і $\nu = 0,33$), коли $V = c = 5850$ м/с, то

за $\sigma_0 = -1$ кН/мм²: $v_F = -21$ м/с, $D = 0,83$ Н/мм², $h_s = 6,8$ см;

а за $\sigma_0 = -500$ Н/мм²: $v_F = -10$ м/с, $D = 0,2$ Н/мм², $h_s = 27,2$ см.

Слід зазначити, що ефективна поверхнева енергія Γ для сталі включає і приповерхневу пластичну енергію, розсіяну в тонкому шарі на поверхні тріщини. Отже, навіть така груба оцінка розміру сталевих фрагментів, що виходить із точного балансу енергії у хвилі руйнування, забезпечує реалістичну картину, що стосується обвалу всіх трьох будинків 11 вересня 2001, оскільки розраховані значення h_s набагато менші від висоти колони на поверсі.

За іншим підходом до оцінки розмірів сталевих фрагментів, утворених під час обвалу будинків, можна змодельовати будинок як твердотілий матеріальний об'єм тієї ж маси і форми, структурно ортотропний із вертикальною віссю симетрії і полярними площинами симетрії, жорсткість якого в цих напрямках дорівнює жорсткості будинку. Ефективна поверхнева енергія цього модельного матеріалу дорівнює $(1 - \varepsilon)^\Gamma$, де ε – відношення порожнього об'єму до загального об'єму будинку, а Γ – ефективна поверхнева енергія сталі. Поширення хвиль руйнування в пористих матеріалах вимагає застосування подібного підходу.

Додаток 2. Офіційна „теорія”

Фрагмент статті Bazant Z.P., Zhou Y. Why did the World Trade Center collapse? – Simple analysis // J. Engineering Mechanics, 2002. – Vol. 128. – No. 1. – P. 1–6.

Чому Міжнародний торговий центр обвалився? Простий аналіз

З.П. Базант, Ю. Жоу

Вступ і сценарій руйнування

110-поверхові вежі Міжнародного торгового центру були спроектовані так, щоб вони могли протистояти в цілому силам, зумовленим горизонтальним ударом великого комерційного літака. Отже, чому відбувався повний обвал? Причиною був динамічний наслідок тривалого нагрівання сталевих колон до дуже високої температури. Нагрівання знизило межу текучості і зумовило в'язкопластичну (за умов повзучості) втрату стійкості колон зовнішнього каркасу уздовж периметра вежі і колон ядра будинку. Ймовірний сценарій руйнування приблизно наступний.

У стадії 1 (рис. 1) внаслідок пожежі, зумовленої згорянням розлитого у будівлі палива літака, сталь колон була під дією високих температур, очевидно вище 800°C. Нагрівання ймовірно було пришвидшене втратою захисної теплової ізоляції сталі під час початкового вибуху. За таких температур у конструкційній сталі зменшується межа текучості і вона зазнає істотних в'язкопластичних деформацій (тобто, повзучості – збільшення деформації за сталого навантаження). Це зумовлює втрату стійкості колон за умов повзучості (Bazant і Cedolin 1991, Розд. 9) і, як наслідок, втрату їхньої утримувальної здатності (стадія 2). Коли на критичному поверсі більше половини найбільш нагрітих колон втрачають стійкість (стадія 3), вага верхньої частини конструкції вище від цього поверху більше не може бути утримана, а тому верхня частина починає з пришвидшенням падати на частину нижче критичного поверху, поки не відбудеться удар із цією нижньою частиною. У цей момент, верхня частина набуде величезної кінетичної енергії та істотної швидкості падіння. Вертикальний удар маси верхньої частини об нижчу частину (стадія 4) зумовлює надмірне вертикальне динамічне навантаження на основну конструкцію, що значно перевищує її утримувальну здатність, навіть без впливу нагрівання. Це зумовлює руйнування основної частини багатоповислої вежі (стадія 4), у якій руйнування кріплення стропильних ферм підлоги до колон одномоментно або послідовно супроводжується

втратою стійкості центральних колон і загальною втратою стійкості зовнішнього каркасу, із втратою стійкості, що ймовірно охоплює висоту багатьох поверхів (стадія 5, справа), і верхня частина можливо утискується в уже порожню нижчу частину зовнішнього каркасу (стадія 5, зліва). Втрата стійкості спочатку пластична, але швидко зумовлює руйнування пластичних шарнірів. Частина будівлі, розташована нижче, після цього знову піддається удару ще більшої маси, що падає з більшою швидкістю і шлях униз супроводжується низкою таких ударів і руйнувань (стадія 5).

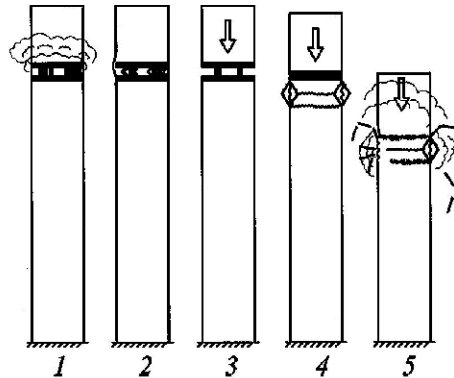


Рис. 1. Стадії обвалу будівлі (висота поверху перебільшена)

Динамічний аналіз теорії пружності. Деталі процесу руйнування після вирішального початкового пускового механізму, що приводить верхню частину будівлі в рух, звичайно дуже складні, і їхнє роз'яснення вимагало б багатьох комп'ютерних моделювань. Наприклад, верхня частина однієї вежі нахилиється, коли починає падати; розподіл ударного навантаження на основні колони зовнішнього каркасу і ядра та між колонами і стропильними фермами, що утримують підлогу, дуже неоднорідний; і т.д. Однак, комп'ютер не потрібний, щоб зробити висновок, що обвал більшості колон одного поверху повинен був зумовити руйнування цілої вежі. Це може бути продемонстровано наступними елементарними обчисленнями, у яких зроблені найбільш оптимістичні в сенсі витривалості спрощувальні припущення.

Протягом короткого часу після вертикального удару верхньої частини, але після того, як пружна хвиля, утворена вертикальним ударом, поширилася до землі, поведінку нижньої частини конструкції можна наближено розглядати як дію пружини (рис. 2(a)). Яка ж її жорсткість C ? Вона може істотно змінюватися залежно від розподілу сили удару по колонах зовнішнього каркасу та між цими колонами і тими, що розташовані в ядрі, а також між колонами та стропильними фермами, що утримують плити залізобетонної підлоги.

Задля нашої мети можна припустити, що всі сили удару припадають на колони і розподілені поміж ними однаково. Навряд чи такий розподіл може існувати, проте це найбільш оптимістична гіпотеза, яку можна висунути,

оскільки опір будинку ударові за такого розподілу найвищий. Якби будинок, зазнав руйнування при однорідному розподілі ударних сил, то він зазнав би руйнування при будь-якому іншому розподілі. Відповідно до цієї гіпотези, можна оцінити, що $C \approx 71$ ГН/м (через відсутність точних даних, з цією метою був виконаний наближений розрахунок поперечних перерізів колон).

Переміщення вниз відносно початкового положення рівноваги до точки максимального відхилення нижньої частини (за умови її пружної поведінки) дорівнює $h + (P/C)$, де P – максимальна сила, від дії верхньої частини конструкції на нижню, а h – висота колон критичного поверху (висота початкового падіння верхньої частини $h \approx 3,7$ м). Дисипацією енергії, особливо внаслідок непружної деформації колон під час початкового падіння верхньої частини, можна знехтувати, тобто можна припустити, що верхня частина переміщується по висоті h майже в режимі вільного падіння (дійсно, енергія, розсіяна в колонах під час

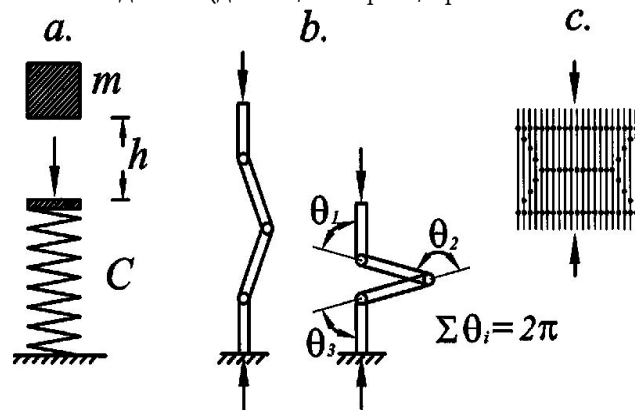


Рис. 2. (а) Модель удару верхньої частини будівлі об нижню;
(б) Механізм пластичної втрати стійкості на лінії однієї колони;
(с) Поєднання пластичних шарнірів, що спричинює втрату стійкості в стінці труби

падіння, максимально дорівнює $2\pi \times$ момент текучості колон \times кількість колон, що дорівнює приблизно тільки 12 % від зміни потенціальної енергії, якщо би колони були не нагрітими і набагато менше від цього за 800°C). Тобто втрата потенціальної енергії верхньої частини може приблизно дорівнювати енергії деформації нижньої частини при максимальному пружному відхиленні. Це дає рівняння $mg[h + (P/C)] = P^2/2C$, де m – маса верхньої частини (для Північної Вежі $\approx 58 \cdot 10^6$ кг), а g – пришвидшення вільного падіння. З розв'язку при $P = P_{\text{dyn}}$ отримується наступне перевантаження внаслідок удару верхньої частини, обчислене за припущень пружності:

$$P_{\text{dyn}} / P_0 = 1 + \sqrt{1 + (2Ch/mg)} \approx 31, \quad (1)$$

де $P_0 = mg$ – запроектована утримувальна здатність. Незважаючи на наближену природу цього аналізу, очевидно, що пружно обчислені зусилля в колонах, що зумовлені вертикальним ударом верхньої частини, перевищили утримувальну здатність нижньої частини принаймні на порядок цієї величини.

Інша оцінка, яка дає початкове перевантаження, що триває тільки частки секунди в момент удару,

$$P_{\text{dyn}} / P_0 = (A / P_0) \sqrt{2\rho g E_{\text{ef}} h} \approx 64,5, \quad (2)$$

де A – площа поперечного перерізу будинку; E_{ef} – жорсткість поперечного перерізу всіх колон поділена на A ; ρ – характерна маса одиниці об'єму будівлі (густина). Ця оцінка обчислена з рівняння пружних хвиль, що дає інтенсивність стрибкоподібного фронту набігаючої хвилі тиску, зумовленої ударом, якщо швидкість верхньої частини в момент удару на критичному поверсі розглядається як крайова умова (Bazant і Cedolin, 1991, Розд. 13.1). Після того, як хвиля пошириться до землі, вірогідною є попередня оцінка.

Аналіз дисипації непружної енергії. Непружна деформація сталі веж зумовлена пластичністю і тріщиноутворенням. Оскільки ми не намагаємося змодельовувати деталі реального механізму руйнування, але прагнемо тільки довести, що вежі повинні були зруйнуватися і обвалилися у спосіб, описаний у (Post and Winston, 2001; American 2001), тут буде знехтувано тріщиноутворенням, навіть при тому, що розвиток тріщин, особливо в кріпленнях колон, чітко простежується на фотографіях обвалу. Припустивши, що сталь повинна поводитися пластично, з необмеженою в'язкістю, ми робимо найбільш оптимістичне припущення щодо здатності веж встояти (насправді ж пластичні шарніри, особливо шарніри в кріпленнях колон, повинні були зруйнуватися, і зробили це при відносно малому куті повертання, зумовлюючи істотне зменшення утримувальної здатності).

Основне питання, на яке потрібно відповісти: Чи може падіння верхньої частини бути зупинене дисипацією енергії під час пластичної деформації, яка настає після початкового пружного деформування? Можна розглянути багато механізмів пластичного руйнування, наприклад: (1) колони основного поверху втрачають стійкість локально (рис. 1, стадія 2); (2) стропильні ферми, що утримують підлогу, руйнуються на з'єднаннях із зовнішнім каркасом та з основними колонами і падають у межах каркасу, залишаючи основні колони і зовнішній каркас без підтримки з боку, і в такий спосіб просувають деформацію основних колон і зовнішнього каркасу при вертикальному стиску (рис. 1, стадія 4 і рис. 2(с)); або (3) верхня частина частково втиснута у межах спорожнілого зовнішнього каркасу нижньої частини, розштовхує стіни зовнішнього каркасу назовні (рис. 1, стадія 5). Можна довести, що кожен з цих механізмів здатний зумовити повний обвал, проте комбінація останніх двох здається найбільш реалістичною [причина: багатопверхові частини зовнішнього каркасу, з майже прямими

границями, що, очевидно, відповідають лініям пластичних шарнірів, які зумовлюють втрату стійкості стін зовнішнього каркасу, були сфотографовані у момент падіння (Post and Winston, 2001; American 2001)].

Незалежно від точного способу руйнування, досвід із питань втрати стійкості свідчить, що у той час як багато пружних короблень одночасно співіснують у стиснутій вздовж осі трубі, пластична деформація локалізується (внаслідок пластичної біфуркації) у єдиному коробленні на раз (рис. 1, стадія 4 і рис. 2(c)), і в такий спосіб шарніри повинні скластися один за одним. Таким чином необхідно одночасно від одного до чотирьох пластичних шарнірів на лінії колони, щоб дати можливість верхній частині продовжувати падати (рис. 2(b)) (Bazant і Cedolin 1991). (Твердження також вірне, якщо колони тільки одного поверху втрачають стійкість разом.) Насамкінець, сума кутів повертання θ_i ($i = 1, 2, \dots$) шарнірів на лінії однієї колони не може перевищити 2π (рис. 2(b)). Ця верхня межа, що не залежить від кількості поверхів, колони яких втрачають стійкість, використовується в даних обчисленнях тому, що в сенсі витривалості вона є найоптимістичнішою гіпотезою, що максимізує пластичну дисипацію енергії.

Обчислюючи дисипацію на одиницю ширини колони зовнішнього каркасу як добуток пластичного згинального моменту M_p однієї колони (Jirasek і Bazant 2002) на загальний кут повороту $\sum \theta_i = 2\pi$ (рис. 2(b)) і множачи її на кількість колон, можна стверджувати, що пластично розсіяна енергія W_p дорівнює, оптимістично, порядку 0.5 ГН·м (за недостатності інформації, окремі деталі, такі як товщина стінки сталевих колон, були оцінені, виконуючи приблизні обчислення за планом будівлі).

Щоб досягти загального кута повертання $\sum \theta_i = 2\pi$ пластичних шарнірів на лінії кожної колони, верхня частина будинку повинна пройти додатковий шлях завдовжки принаймні у висоту одного поверху, що розташований під поверхом, на якому почався обвал, і таким чином повна зміна потенціальної енергії дорівнює $W_g = mg \cdot 2h \approx 2 \times 2,1 = 4,2$ ГН·м. Щоб зупинити падіння кінетична енергія верхньої частини, що дорівнює зміні потенціальної енергії, повинна була би поглинутися повертанням пластичних шарнірів, тобто, W_p повинна бути більшою від W_g . Однак

$$W_g / W_p \approx 8,4 . \quad (3)$$

Тому навіть відповідно до найбільш оптимістичних припущень, пластична деформація може розсіяти лише незначну частину кінетичної енергії, що набута верхньою частиною будинку.

Поки сформується наступне короблення з групою пластичних шарнірів, верхня частина вже пройде багато поверхів униз і набуде набагато більшої кінетичної енергії; частка кінетичної енергії, розсіяної пластично, має тоді порядок 1 %. Ця частка продовжує надалі зменшуватися, оскільки верхня частина падає. Якщо розглянути тріщиноутворення у пластичних шарнірах, то буде отримано ще меншу (насправді, набагато меншу) дисипацію енергії.

Таким чином, обвал вежі повинен відбуватися майже в режимі вільного падіння. Цей висновок підтверджується тим, що тривалість обвалу кожної вежі, яка дорівнювала приблизно 10 с, була приблизно такою ж як і тривалість вільного падіння у вакуумі від вершечка вежі $H = 416$ м до вершини купи руїн ($H_0 = 25$ м), що дорівнює $t = \sqrt{2(H - H_0)/g} = 8,93$ с. Із цього випливає, що головний удар вертикального падіння припав в основному безпосередньо на колони зовнішнього каркасу і ядра, а також що фронт обвалу поверхнів, можливо, не просунувся істотно перед фронтом обвалу зовнішнього каркасу, адже інакше обвал зовнішнього каркасу повинен був тривати значно довше, ніж 9 с.

Заключні коментарі та задача зменшення катастроф. Проектування висотних будинків, які б могли протистояти такому типу нападів здається майже неможливим. Воно вимагало б набагато товстішої ізоляції сталі зі стійким до вибуху захисним покриттям. Заміна прямокутного зовнішнього каркасу укріпленим круглим монолітним каркасом з маленькими вікнами могла б допомогти відхилити значну частину уламків зіткнення літака і паливо в сторони, але незалежно від вартості, хто би хотів працювати в такому будинку?

Задача є також важливою при проектуванні бетонних колон, оскільки бетон, нагрітий до таких температур, піддається вибуховому тепловому розтріскуванню, тепловому руйнуванню, і розпадові внаслідок дегідратації (Bazant і Kaplan 1996). Ці питання стосуються не тільки будинків, що утримуються завдяки багатьом колонам, але також і для недавніх проектів високих будинків з масивним монолітним бетонним ядром, що функціонує як трубчаста цюгла. Ці недавні проекти використовують бетон високої міцності, що, однак, ще більше піддається впливу вибухового теплового розтріскування і теплового руйнування, ніж звичайний бетон. Використання жаростійких бетонів як конструкційних матеріалів має багато невирішених питань (Bazant і Kaplan 1996). Спеціальні сплави або різні жаростійкі керамічні композити можуть, звичайно, функціонувати при таких температурах, але вартість будівлі збільшилася би астрономічно.

Було би також доречним почати дослідження матеріалів і проектів, що відтермінували б обвал будинку для того, щоб збільшити необхідний для евакуації час, забезпечили укріплену і краще ізольовану сходову клітку, або навіть запобігти обвалу у випадку менш серйозного нападу, такого як позацентровий удар, або удар літака, що містить менше палива.

Важливою загадкою на цей час є те, чому суміжний 46-поверховий будинок, на який імовірно не було розлито істотну кількість палива літака, також зруйнувався. Незважаючи на недостатність даних, на цей час ймовірним видається пояснення, що високі температури (можливо значно нижчі за 800°C) утримувалися принаймні на одному поверсі того будинку протягом набагато тривалішого часу, ніж той, що визначається поточними умовами горіння.

-
1. American Media Specials. (2001). September, Boca Raton, Fla.

2. Bazant Z.P., and Cedolin L. (1991). Stability of structures: Elastic, inelastic, fracture and damage theories, Oxford University Press, New York.
3. Bazant Z.P., and Kaplan M.F. (1996). Concrete at high temperatures, Longman–Addison-Wesley, London.
4. Bazant Z. P., and Planas J. (1998). Fracture and size effect of concrete and other quasibrittle materials, CRC Press, Boca Raton, Fla.
5. Jirasek M., Bazant Z.P. (2002). Inelastic analysis of structures, Wiley, New York.
6. Levy M., Salvadori M. (1992). Why buildings fall down, W. W. Norton, New York.
7. "Massive assault doomed towers." (2001). Eng. News-Rec., 247(12), 10–13.
8. Post N.M., Winston S. Massive Assault Doomed Towers // Engineering News-Record (September 17, 2001), 247(12), P. 10–13.

**О ОБВАЛЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ТОРГОВОГО ЦЕНТРА
В НЬЮ-ЙОРКЕ 11 СЕНТЯБРЯ 2001 ГОДА**

Геннадий ЧЕРЕПАНОВ

Майами, Флорида, США

Рассмотрено отличную от официальной версию обвала Международного торгового центра в Нью-Йорке. Доказано, что официальная "теория" обвала неверна, поскольку она построена на ложных предположениях и неверных вычислениях.

Ключевые слова: колонна, обвал, взрыв, волна разрушения, динамический удар, прогрессирующее разрушение.

DOWN ON THE INTERNATIONAL TRADE CENTRE
NEW YORK SEPTEMBER 11, 2001

Gennady CHEREPANOV

Miami, Florida, USA

Considered different from the official version of the collapse of World Trade Centre in New York. We prove that the official "theory" collapse is false because it is built on false assumptions and incorrect calculations.

Keywords: column, collapse, explosion, a wave of destruction, dynamic impact, a progressive deterioration.

Стаття надійшла до редколегії 16.03.2009

Прийнята до друку 22.12.2010