

ADVANTAGES OF APPLYING ELASTIC WAVES THEORY IN SOLVING DYNAMIC PROBLEMS

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ УПРУГИХ ВОЛН ПРИ РЕШЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Iryna Bondarenko¹

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-195-4-12>

Abstract. *The purpose* of the paper is to demonstrate that the application of the theory of elastic waves in solving dynamic problems allows expanding the possibilities of a modeling and diagnosing natural phenomena necessary for productively solving the issues of ensuring the functional safety of objects in the technosphere of the human habitat. The method based on the use of the provisions of the elastic waves' theory provides the analytical modeling of natural processes inside the simulated objects in time. *Methodology.* The paper evaluated the advantages and disadvantages of approaches to modeling dynamic processes. A holistic approach to the modeling of dynamic processes was formed, using the theories of elastic waves, examples demonstrating the advantages of the proposed approach are given. *Results* of the paper showed that applying elastic waves theory allows complementing the description of force impulses, such characteristic as a law of altering the force impulse in time. The possibility of using the time to describe the effect of force impulses on any object allows extending the use of the second law of motion and applying the first law of thermodynamics in time. *Practical implications.* The proposed approach facilitates the detailed operation of operating conditions and takes into account the structural, technical, and technological characteristics of the operation of different facilities. This makes it possible to optimize objects by modifying their construction, the properties of the materials of objects, and the technology of maintenance for specific operating conditions. All this contributes to increasing the competitiveness of the facilities as a whole. *Value/ originality.* Since it is possible to use the law of momentum conservation for

¹ Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
«Futurum Ukraine» Non-governmental Organization, Ukraine

individual objects as well as for parts of them, using the holistic approach makes it possible to turn to systems previously considered open.

1. Вступление

Технологическое развитие человечества столкнулось с необходимостью обеспечить инженеров и ученых инновационным и эффективным инструментом для продуктивного решения вопросов обеспечения функциональной безопасности объектов техносферы среды обитания человека.

Проблема состоит в том, что оценка рисков функциональной безопасности любых объектов инженерии связана с определением второго граничного состояния [1, с. 13, п. 6.2.3], при котором определяется пригодность объектов выполнять свои функции безопасно (с определенными уровнями риска на всех этапах жизненного цикла) и эффективно (с определенным уровнем издержек) в условиях конкретных параметров эксплуатации. По этому состоянию должны быть оценены характеристики деформативности.

Но современные инструменты, используемые для определения состояния объекта (методы и программные продукты) базируются на принципах, разработанных для определения первого предельного состояния [1, с. 13, п. 6.2.2], определяющего общую пригодность объекта работать в определенных условиях. По этому состоянию оценивают показатели прочности и устойчивости, полученные путем численного моделирования, например, методом конечных элементов, для имитации квазидинамических процессов деформации, происходящих внутри элементов под действием внешних воздействий.

При численном моделировании соответствующее решение определяется путём подбора данных, то есть моделируются условия для получения определенного результата. Но для оценки рисков необходимо применять аналитические методы, использующие пространственно-временные зависимости и имитирующие процессы, происходящие внутри как каждого элемента конструкции, так и в конструкции вообще под действием внешних воздействий.

Для машиностроения и оборудования, транспортной инфраструктуры, горнодобывающей, военной, строительной, энергетической и природо-охранной техники с 70-х годов прошлого века основной целью

проектирования является обеспечение условий деформативности. Но специалисты рынков CAD/CAM и мультифизической инженерии, такие как университеты, научные лаборатории, компании, занимающиеся проектированием, обслуживанием и испытанием механических систем, используют численные расчеты, подобные методу конечных элементов, которые используют основы, разработанные для обеспечения условий прочности и устойчивости механических систем, но не деформативности. Поэтому технические расчеты содержат слишком много ненужных приближений и допущений, мешающих моделировать природные явления. Существующие подходы инженерии позволяют решать аналитическими методами только 3% задач, остальные 97% решаются путем подбора индивидуальных решений, основанных на экспериментальных данных, полученных для определенных условий, так как расчетные системы не учитывают такие временные характеристики как:

- изменение импульса во времени;
- изменение деформативности объектов во времени.

Отсутствие параметра времени в расчетах не позволяет установить связь между исходными причинами и симптомами, которые выявляются в результате.

Таким образом, на рынке расчета 3D-моделирования отсутствует инструмент для расчета реальных процессов деформативности в объектах, что приводит к необходимости проведения дополнительных экспериментов для минимизации ошибки.

Решением этой проблемы является, во-первых, формирование подхода к аналитическому решению задач определения параметров деформативности во времени с использованием теории упругих волн. Во-вторых, создание программного обеспечения для решения задач определения параметров деформативности конструкций объектов для оценки рисков их эксплуатации.

Данная работа имеет целью показать, что применение теории упругих волн при решении динамических задач позволяет расширить возможности моделирования и диагностики природных явлений, необходимых для продуктивного решения вопросов обеспечения функциональной безопасности объектов техносферы среды обитания человека.

2. Существующие проблемы моделирования динамических процессов

В настоящее время вся наука физика, все ее понятия и законы группируются вокруг фундаментальных теорий: ньютоновской механики и теории относительности, молекулярно-кинетической теории и принципов термодинамики, теории электромагнитного поля и электронной теории, теории колебаний, квантовой теории [2, с. 12]. Высокий теоретический уровень развития физики приводит к тому, что в ней очень широко используются математические методы и очень многие положения выводятся из основных. Вместе с тем, физика, как часть естествознания, является наукой экспериментальной. Эксперимент служит в ней как исходной базой, поставляющей фактический материал, так и методом проверки, того или иного следствия теории. Условия применение математического аппарата и методики эксперимента зависят от условия поставленной задачи. Как уже указывалось ранее, для обеспечения работоспособности объектов, рассматривались условия потери несущей способности или непригодности к эксплуатации, критериями которых выступают прочность, устойчивость и выносливость. Поэтому методы моделирования и проведения экспериментов соответствовали определению этих критериев. Для таких условий достаточно было рассматривать динамический процесс как квазидинамический, поскольку основными оценочными параметрами выступали величины максимально возможных напряжений или деформаций, появляющиеся в объектах в процессе эксплуатации. Эти же величины напряжений и деформаций, измеряются и в экспериментах.

Таким образом, для изучения квазидинамического воздействия на любой объект необходимо задать исходные данные в виде: геометрических моделей или приведенных масс; типы связей между элементами; жесткостные (упругие) свойства элементов; локацию, направление и значение воздействия. В результате расчета получают данные напряжено-деформированного состояния объекта.

При моделировании силовых квазидинамических процессов используют следующие допущения:

1. Воздействие на объект задается в виде действия квазидинамической силы, значение которой учитывает максимально вероятную совокупность влияния статических и динамических сил. Воздействие

циклической силы описывается законом ее изменения, который характеризуется частотой ее повторения.

2. Перемещение точек объекта обусловлены его деформациями, которые значительно меньше размеров тела. Сила вызывает прямо пропорциональные деформации в направлении силы, обусловленные жесткостью объекта.

3. Считается что сила в объекте вызывает мгновенное изменение его напряженно-деформированного состояния. Таким образом, заложено отсутствие временной зависимости между моментом приложения силы и моментом ее преобразования.

4. Деформативность объекта, как совокупность деформаций и перемещений всех элементов, представлена линией (полем, при использовании методов, подобных методу конечных элементов) влияния. Считается что линия влияния имеет определенную форму при воздействии одиночной силы и их суперпозицию при действии группы сил. Линия влияния перемещается вместе с перемещением силы или группы сил вдоль объекта.

Перечисленные допущения выступают в роли ограничений при изучении вопросов изменений, происходящих в объекте при действии временной нагрузки поскольку:

1. Как правило, не существует изолировано работающего под динамическими нагрузками объекта. Рассматриваемый объект в инженерии чаще состоит из совокупности связанных между собой различных элементов, каждый из которых характеризуется своими физико-механическими и геометрическими характеристиками. Отсутствие временной составляющей не позволяет изучить какие изменения происходят в элементах во времени, как эти изменения влияют на функционально-безопасное состояние каждого элемента и как их совокупность влияет на работу объекта.

2. При любом влиянии нагрузки на объект она имеет время воздействия и закон воздействия, характеризующиеся фактическими условиями эксплуатации. В тоже время любой элемент обладает «своим» временем на восприятие силового воздействия и последующую реакцию на это воздействие, которые формируют жесткостные (упругие) характеристики объекта. Отсутствие временной составляющей не позволяет изучить, как и за счет чего изменяются жесткостные и геометрические параметры объекта и его деформативное состояние во времени.

3. Как правило при функционировании, процесс деформативности объекта происходит под влиянием силовых, электромагнитных и гравитационных полей на фоне протекания процессов изменения температуры и влажности. Среди описанных процессов только протекание процесса силового влияния не описано временной зависимостью. Отсутствие временной составляющей не позволяет изучить взаимосвязь и влияние этих процессов на функционально-безопасное состояние объекта во времени.

Таким образом, появилась необходимость описать фундаментальные положения физики математическими методами, позволяющими изучить протекание динамических процессов, для формирования условий функционально безопасной работы объектов.

3. Описание динамических процессов средствами теории упругости

В зависимости от того, какие величины принимают в качестве основных неизвестных, различают три способа решения задачи теории упругости:

- решение в перемещениях;
- решение в напряжениях;
- смешанное решение.

Решение задачи в перемещениях сводится к интегрированию трех уравнений Ламе при удовлетворении условий на поверхности. По найденным перемещениям из формул Коши находят деформации и, далее из формул закона Гука находят напряжения.

Для решения задачи в напряжениях необходимо проинтегрировать три уравнения Навье вместе с шестью уравнениями Бельтрами-Митчелла при удовлетворении условий на поверхности. После этого по формулам закона Гука получают деформации и, далее, по формулам Коши – перемещения.

Для решения задачи теории упругости во всех случаях должны учитываться условия на поверхности (граничные условия). Для этого должно быть задано уравнение поверхности тела и силы или перемещения ее точек.

Различают два типа граничных условий: кинематические, когда задаются значения перемещений точек поверхности, и статические, если задаются значения напряжений на поверхности.

Возможны также смешанные граничные условия, когда на части поверхности задаются перемещения, а на части – напряжения.

Различают три основных математических метода решения задачи теории упругости:

- прямой метод, который заключается в непосредственном интегрировании основных уравнений при выполнении граничных условий;
- обратный метод, если задаются функциями напряжений или перемещений, удовлетворяющими дифференциальным уравнениям задачи, а затем устанавливают, каким граничным условиям эти функции соответствуют;
- полуобратный метод Сен-Венана, когда задаются частью функций перемещений или напряжений и из уравнений задачи устанавливают, каким условиям должны удовлетворять остальные функции. При этом дифференциальные уравнения существенно упрощаются.

Таким образом, использование теории упругости при решении задач имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам относятся следующие положения:

1. Внутреннее состояние характеризуется с помощью ряда величин: напряжений, деформаций, температур и т. д.
2. Построение модели материала основывается на понятии материального континуума: представлении реального материала как бесконечной совокупности элементарных материальных частиц, которые в геометрическом смысле можно рассматривать как точки, а в физическом смысле как частицы, наделенные свойствами материала в целом.
3. Материал при деформации рассматривается как совокупность точек, взаимное расположение которых изменяется в результате физических воздействий на материал или тело. Гипотеза сплошности приводит к тому, что соседние материальные частицы, которые были смежными в естественном начальном состоянии остаются смежными и в деформированном состоянии. Это физическая интерпретация того, что изменение материала происходит непрерывно, при этом никакая материальная частица не превращается в объем исчезающе малый или бесконечно большой.
4. При деформировании сплошной среды все материальные частицы могут получать перемещения. В основе классической теории деформаций лежит метод описания кинематики сплошной среды

с помощью вычисления удлинений линейных элементов и изменений углов между линейными элементами, имеющими общую вершину.

К недостаткам теории упругости относятся нижеприведенные положения:

1. Основной проблемой теории упругости является отсутствие временной составляющей. Нет зависимостей, которые во временной шкале связывают продолжительность воздействия силы, деформации или напряжения.

2. В теории напряжений изучаются внутренние силы, возникающие в твердых деформируемых материалах или объектах в следствии физических воздействий на них. При внешнем физическом воздействии изменяются расстояния между внутренними точками материала (материальными частицами), в следствии этого возникают внутренние силы, которые отражают макроскопическое взаимодействие между атомами или молекулами. Для описания внутренних сил в теории напряжений используются метод сечений и аксиома связи. Внутренние силы могут изменяться при переходе от одной частицы к другой, и поэтому напряженное состояние в объекте в общем случае является неоднородным (также, как и деформируемое состояние). Но деформации можно измерить, а напряжения нет, так как для измерения напряжений физически измеряют деформации. Поэтому теория напряжений аксиоматическая, а напряжение является искусственной мерой внутренних сил, возникающих в объекте.

3. В теории деформаций кинематика сплошной среды рассматривается вне зависимости от физических воздействий. В теории напряжений изучаются внутренние силы, возникающие в объекте или в материале, в результате физического воздействия, при этом ни в теории деформаций, ни в теории напряжений не учитывались конкретные свойства материала для описания протекания процесса распространения силовых воздействий внутри объектов. Даже при использовании численных методов моделирования, например метода конечных элементов, разбиение внутренней сетки не зависит от свойств материалов.

4. Поведение конкретных материалов и конструкций объектов, а также связей между ними, под различными воздействиями, придаются изучаемым моделям с помощью определяющих соотношений. Для построения определяющих соотношений проводят эксперименты по

физическому воздействию на образцы объектов. Из обработки данных экспериментов устанавливают конкретный вид зависимостей и значения входящих в эти зависимости констант. Поэтому такие эксперименты называют установочными экспериментами, а константы в выражениях – материальными константами. И эксперименты, и константы применимы только для рассматриваемых условий и отображают реальные физические процессы по отдельным коррелируемым аспектам, физическая природа которых не учитывается.

5. Теория упругости отлично описывает материал объектов используя понятие материального континуума, но полностью исключает возможность изучения поведения внутренних сил. Знание механизмов изменения внутренних сил используется, например, для создания материалов с высоким или низким демпфированием механических колебаний, применяемых в различных областях техники. Даже при изучении внутреннего состояния в упругости анизотропных материалов рассматривается макроскопическое поведение материалов, то есть атомное или молекулярное строение не рассматривается.

Указанные шесть недостатков далее будут использоваться как направления усовершенствования моделирования за счет использования теории упругих волн.

4. Преимущества использования теории упругих волн

Объемные акустические волны в твердом теле нашли широкое применение как в научных исследованиях, так и в промышленной технологии. В последние годы, после открытия надежных способов возбуждения ультразвука, возрос интерес к нему как к средству контроля механических свойств материалов. О механических свойствах материалов можно судить по акустическим характеристикам, поскольку акустические параметры такие, как скорость распространения упругих волн, затухание, дисперсия, связаны с механическими свойствами материалов.

Волны сжатия (P -волны, или продольные волны) заставляют частицы материала колебаться, подобно спиральной пружине, вдоль направления распространения волны путем чередования участков сжатия и разрежения. Волны сдвига (S -волны, или поперечные волны) заставляют частицы колебаться перпендикулярно направлению рас-

пространения волны, подобно вибрирующей гитарной струне. S -волны распространяются только через материал, обладающий упругостью. Благодаря этому явлению в 1906 г. Английский сейсмолог Олдгем, наблюдая за распространением S -волн, сделал вывод о существовании земного ядра, так как S -волны не в состоянии проходить через жидкое ядро Земли.

Скорости объемных продольных и поперечных волн зависят от механических свойств материала, в котором они распространяются. Скорость P -волн больше скорости S -волн.

В литературе наиболее часто рассматриваются плоские объемные волны. Понятие плоской упругой волны, для которой поверхность равных фаз (фронт волны) является плоскостью, отражает бесконечно широкий поток акустической энергии. В действительности же никогда не существует идеально плоских волн. В любом реальном случае при ограниченных поперечных размерах акустического пучка имеет место дифракционная расходимость, которая приводит к искривлению фазового фронта. Лишь в некоторых случаях, когда реальный пучок имеет большое поперечное сечение по сравнению с длиной волны, он может приближенно считаться плоской волной. Объемные волны с неплоскими фронтами представляют в виде так называемого углового спектра, который по существу представляет собой бесконечную сумму плоских элементарных волн.

Весьма ценным свойством объемных волн в упругих изотропных средах является отсутствие дисперсии, т. е. зависимости фазовой скорости от частоты вплоть до оптического диапазона. Это свойство облегчает создание широкополосных акустических и акустооптических устройств обработки сигналов.

В кристаллах можно наблюдать затухание объемных волн. Оно зависит от рода кристалла, от типа волны и от направления распространения. Затухание существенно уменьшается при охлаждении звукопровода и почти исчезает при температуре, близкой к абсолютному нулю. У большинства кристаллов при нормальной температуре затухание возрастает пропорционально квадрату частоты.

Несмотря на широкое применение теории упругих волн в диагностике и понимании что силовые воздействия в объектах передаются с помощью объемных волн, до сих пор не произошло процесса исполь-

зования положений теории упругих волн для аналитического описания распространения динамических процессов в пространстве и времени.

Динамический процесс можно описать в виде двух взаимосвязанных блоков: 1) воздействие, 2) перенос и преобразование воздействия. Далее приведены положения для указанных блоков, на которых базируется предлагаемое в работе моделирование динамических процессов с помощью теории упругих волн.

1. Воздействие. Будем рассматривать импульсы в качестве меры воздействий различных физических величин на объект во времени, при котором происходит обмен энергией во времени. Например, по закону Гука, сила, действующая на объект, вызывает прямо пропорциональные деформации или перемещения. При действии силы на объект последний будет совершать работу, равную произведению силы на перемещение. Действие постоянной в единицу времени силы на объект, не зависимо от времени ее воздействия, характеризуется одинаковым значением количества движения в единицу времени, что служит потенциалом для совершения одинакового количества работы объекта в единицу времени. Значит, передает одинаковое количество энергии во времени за время действия силы. Таким образом, импульсы постоянных сил передают постоянное количество энергии в единицу времени и вынуждают объект либо иметь постоянную деформацию под их воздействием, то есть ведут себя согласно законам статики с момента установления равновесия. Либо, если тело не взаимодействует с другими телами, двигаться прямолинейно и равномерно с установившейся в этой среде скоростью. Если же сила имеет переменное значение во времени, тогда импульсы переменных сил вызывают обмен переменным количеством энергии в единицу времени за время действия силы. Поскольку при воздействии происходит обмен энергией, то одной из его характеристик является закон изменения воздействующей физической величины во времени. Данная величина характеризует интенсивность воздействия импульса силы. При описании воздействий, амплитуда силы характеризует силу удара в механических системах или громкость в музыке. А интенсивность воздействия позволяет описывать такие характеристики воздействия как «legato» и «moderato» и плотность звучания в музыке или «мягкий» и «жесткий/резкий» удар в механических системах.

Как указано выше, при импульсах происходит передача энергии во времени. Таким образом, действие импульса на объект имеет четкие временные характеристики начала и конца действия, то есть продолжительности воздействия. Что позволяет определить еще одну характеристику: время передачи импульса. Таким образом, влияние любых физических величин, при циклических воздействиях в динамическом процессе, характеризуется двумя видами частот [3, с. 30]:

- частотой (или частотами) передачи импульса, действующего на определенную площадку контакта. Она характеризуется продолжительностью воздействия;

- частотой повторения импульса в определенном сечении. Она характеризуется временем, через которое происходит повторение действия.

Таким образом, возможность использования времени при описании воздействия импульса на любой объект, позволяет расширить использование основного закона механики от формулировки «сила равна производной импульса по времени» [2, с. 56] до «закон изменения импульса силы во времени, характеризующий интенсивность воздействия в единицу времени, определяет изменение количества движения во времени, характеризующее величину энергии во времени на совершение возможной работы в единицу времени».

2. Перенос и преобразование воздействия. При рассмотрении направлений усовершенствования моделирования было указано, что основной проблемой моделирования является отсутствие временной составляющей. Поэтому для описания процесса переноса импульса в объектах необходимо выбрать такой способ, который, во-первых, имеет место во всех средах, из которых может состоять материал объекта (газообразных, жидких и твердых), а во-вторых, имеет закон распространения во времени в указанных средах. Этим условиям соответствует только теория упругих волн. Поэтому перенос воздействия, то есть импульса, при моделировании, осуществляется с помощью распространения упругих волн. Упругие волны обладают свойствами, которые на основании физико-механических и геометрических характеристик объекта, позволяют описать преобразование физических величин как внутри объектов, так и при переходе из одного в другой при моделировании динамических процессов.

На основе теорий упругости и распространения упругих волн разработан метод определения процессов, приводящих к изменению во времени локальных значений деформаций внутри элементов [3, с. 31]. Основным преимуществом предлагаемого метода моделирования является использование способности упругих волн распространять энергию силовых воздействий (импульсов) в пространстве и во времени.

Свойства материалов определяют наличие и скорость распространения внутри элементов поперечных и продольных волн. Закон изменения силового импульса и его направление, как характеристики механического воздействия, определяют направление и величину движений материальных частиц внутри элемента. На рис. 1 показано направление движения как всех видов волн относительно направления действующей силы, так и материальных частиц под действием продольных волн. На рис. 2 показано направленное движение частиц под действием поперечных волн. На рис. 1 и 2 показаны направления движения материальных частиц для одного из сечений пространственного распределения сферических поперечных и продольных волн.

В направлении действия силы вся энергия силового воздействия перемещает материальные частицы посредством продольных волн.

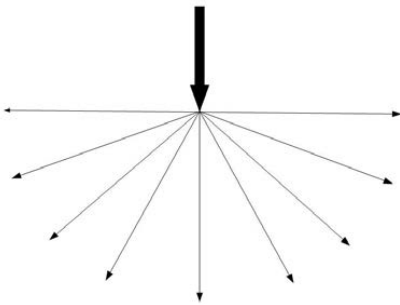


Рис. 1. Направление движения как всех видов волн относительно направления действующей силы, так и материальных частиц под действием продольных волн

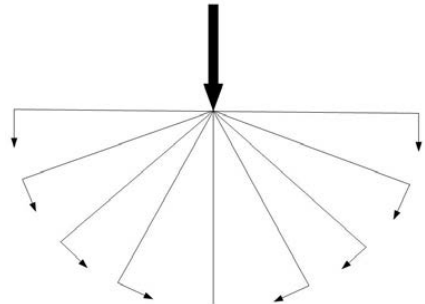


Рис. 2. Направленное движение материальных частиц под действием поперечных волн

В направлении, перпендикулярном направлению действия силы, частицы движутся только за счет поперечных волн. Во всех других направлениях распространения волн частицы приводятся в движения двумя типами волн, в соответствии со скоростью распространения волн, а также временем и амплитудой воздействия на каждую материальную частицу. Процессы отражения и преломления волн зависят как от геометрии объектов и их соединения в конструкции, так и от плотности материала и скорости распространения волн в нем.

Силовой импульс, воздействуя на объект, передает ему определенное количество энергии, которая поглощается и передается внутри объекта силовыми волнами, создающими силовые поля. Последние вызывают движение частиц материала, в результате чего внутри объекта происходят различные физические процессы с изменением во времени:

- локальной плотности материала (изменение расстояния между частицами под действием силовых волн);
- локальной температуры материала (за счет трения при перемещении частиц или неупругого столкновения силовых волн);
- сжимаемости материала (за счет изменения локальной плотности материала, влияющей на изменения движения частиц под действием силовых волн);
- объема объекта (как совокупность описанных выше физических процессов).

Эти физические процессы вызывают: изменение локальной концентрации частиц, изменение локального объема внутри элемента, изменение локальной скорости частиц и, согласно второму закону Ньютона, можно записать в виде:

$$F(t) = R(t) = \frac{d(mu)}{dt} = \frac{d(\rho Vv)}{dt} = \frac{d(nm_0Vv)}{dt} \quad (1)$$

где $F(t)$ – импульс внешней силы, действующей на объект;

$R(t)$ – импульс силового поля, действующего внутри объекта;

m – масса объекта, поглощающего воздействие внешнего импульса за счет импульса силового поля, формируемого на основе суперпозиции силовых волн;

a – ускорение частиц под действием силового поля;

ρ – плотность материала объекта;

V – объем объекта, поглощающий воздействие внешнего импульса за счет импульса силового поля, формируемого на основе суперпозиции силовых волн;

t – время;

v – скорость перемещения частиц, находящихся в силовом поле;

m_0 – масса одной молекулы;

n – концентрация, количество молекул в единице объема.

Основой моделирования при использовании теории упругих волн является наличие волновых процессов, вызванных как внешними, так и внутренними колебаниями. Под колебаниями в данном случае имеются ввиду перемещения частиц объекта под действием силовых волн как падающих, отраженных, так и преломленных волновых процессов.

Согласно теории упругих волн, все колебания, возбуждаемые контактированием поверхностей, которые к этому моменту не соприкасались или возобновили свое контактирование из-за разрыва, распространяются сферическими волнами. Они характеризуют основное направление распространения волнового процесса от места нового или обновленного контакта поверхностей и отвечают за контактные и локальные концентрации деформаций.

Все колебания, возбуждаемые контактированием поверхностей, которые к этому моменту касались и имеют контактные связи, распространяются квазисферическими волнами. Они характеризуют основное направление распространения волнового процесса от места контакта поверхностей и отвечают за неоднородность колебания. Но одна сферическая волна падения, несущая продольную и поперечную моды, вызывает четыре квазисферических преломленных волны: две продольные и две поперечные. Каждая из них неоднородна, поскольку имеет четкую зависимость изменения характеристик распространяясь по «своему» направлению с определенной скоростью и несет последствия от распространения соседних преломленных волн, имеющие собственные скорости и направления распространения.

Поскольку в процессе распространения происходит суперпозиция волн во времени, то она характеризует неоднородность всего колебания. Следовательно, в каждой точке конструкции объекта в определенное время действия будут наблюдаться либо однородные

сферические и (или) неоднородные квазисферические волны. Таким образом, колебания, распространяемые волнами во времени, не могут быть прогнозированы на основе аппроксимации, используемой численными методами расчета, поскольку каждая частица объекта будет иметь траекторию колебания, зависящую как от закона изменения силового импульса, так и от геометрии объекта. Существуют промежуточные времена, когда частицы объекта непосредственно воспринимают и трансформируют силовые воздействия в соответствии со временем распространения процесса силовых волн в объекте. И время, когда частицы объекта смещаются за счет деформаций и смещений других частиц объекта, расположенных за ними в направлении действия силовых волн. Другими словами, как элементы конструкции, так и частицы объектов могут работать «активно» (преобразовывая силовые воздействия), так и «пассивно» [4, с. 67]. Закон изменения силового импульса характеризует деформации и перемещения, связанные с действием приложенного внешнего силового воздействия, то есть при выполнении «активной» работы. Геометрия объекта характеризует «пассивную» работу. Таким образом, различные частицы объекта имеют различные траектории колебаний во времени, а значит и различные локальные концентрации силовых волн во времени, что позволяет прогнозировать места появления усталостных процессов и дефектов при определенных условиях эксплуатации и характеристиках конструкции и материала объекта.

Современные требования конкурентоспособности объектов предусматривают минимизацию стоимости их безопасного функционирования с учетом фактических эксплуатационных условий. Применение теории упругих волн способствует детализация эксплуатационных условий и учету конструкционных, технических и технологических особенностей работы различных объектов. Это позволяет оптимизировать объекты изменяя их конструкцию, свойства материалов объектов, технологию технического содержания. Что дает возможность рационально распределять материальные ресурсы на его изготовление и обслуживание в период эксплуатации, если таково предусмотрено. И, тем самым, все это будет способствовать повышению конкурентной способности объектов в целом.

Использование теории упругих волн позволяет перейти к рассмотрению систем, которые ранее считались открытыми системами,

поскольку по-является возможность использовать закон сохранения импульса ($p=const$) как для отдельных объектов, так и для их частей.

Пример 1. В механике считается, что в ньютоновской области импульс возрастает только за счет роста скорости, так как изменением массы можно пренебречь. В ультрарелятивистской области скорость объекта практически не меняется и импульс растет только за счет роста массы. В релятивистской области рост импульса происходит за счет возрастания обоих сомножителей – как скорости, так и массы. При этом скорость растет медленнее, чем в ньютоновской области, именно из-за возрастания массы ускоряемого объекта. Теория упругих волн позволяет рассмотрение задач распространения импульса в любой области, так как учет времени при распространении силовых волн в объекте, автоматически учитывает как изменение массы во времени, так и изменения скорости протекания процесса деформативности внутри объекта.

Процесс движения объекта в механике характеризуют два вида энергии: кинетическая и потенциальная. Первая характеризует процесс движения с точки зрения изменения скорости, а вторая с точки зрения изменения координаты. Это искусственное разделение энергии, затрачиваемой на процесс движения, связано с историей развития технических расчетов, приведших к существованию на определенном этапе нескольких систем мер: физической и технической [5, с. 247]. В физической системе мер основной единицей измерения является масса, а сила является производной единицей, размер которой получается путем умножения основной единицы массы на размерность ускорения. В технической системе мер масса является производной единицей, получаемая путем деления основной единицы силы на размерность ускорения. В июле 1978 года постоянной комиссией по стандартизации утвержден Стандарт СЭВ 1052-78 «Метрология. Единицы физических величин», согласно которому единицы Международной системы подлежат обязательному применению во всех отраслях науки, техники, народного хозяйства и учебного процесса. Для Советского Союза постановлением Госстандарта СССР единицы СИ стали обязательными к применению с 1 января 1980 года [2, с. 61] и далее автоматически соблюдаются на территории постсоветского пространства. Но, поскольку любую величину силы, действующую в экс-

перименте, легче приложить или измерить, чем определить величину масс, задействованных в эксперименте при динамических процессах, то технические расчеты и логика их развития незримо опираются на техническую систему измерения, где используются эквивалентные/приведенные значения масс.

По этой же причине существует разделение понятий удара на «упругий» и «неупругий». Считается что удар называется абсолютно неупругим, если объекты после соударения движутся с одинаковой скоростью, образуя один новый объект. При этом сохраняется только сумма импульсов соударяющихся объектов, но не сохраняется сумма их кинетической энергии. А упругим называется удар, при котором сохраняются как сумма импульсов, так и сумма кинетической энергии соударяющихся объектов.

Давайте оценим процесс перехода и названия энергий при взаимодействии двух шаров, первый из которых двигался в направлении второго, стоящего неподвижно до столкновения. Приложенная сила к первому шару определила импульс, характеризующий скорость движения шара и импульс взаимодействия со вторым шаром. Движение шара характеризуется величиной кинетической энергии. При столкновении со вторым шаром в зависимости от локации соударения и соотношения между акустическим сопротивлением обоих шаров часть энергии первого шара осталась в нем. В зависимости от соотношения между акустическим сопротивлением обоих шаров и амплитуды отраженного силового импульса, характеризующего количество энергии на совершение работы, первый шар способен: 1) остановиться и деформироваться путем сжатия; 2) изменить параметры движения и деформироваться путем сжатия; 3) остановиться и деформироваться путем растяжения; 4) изменить параметры движения и деформироваться путем растяжения. Точно также, второй шар, восприняв силовой импульс, несущий часть энергии от первого шара, характеризующейся амплитудами преломленного процесса, будет способен: 1) остаться стоять на месте и деформироваться путем сжатия; 2) начать двигаться и деформироваться путем сжатия.

Теория упругости при описании процесса взаимодействия шаров при столкновении использовала бы термины импульс, а также кинетическая и внутренняя энергии. При использовании цепочки импульс –

кинетическая энергия первого / второго шара, этот удар считался бы упругим. А при использовании цепочки импульс – внутренняя энергия первого / второго шара, этот удар считался бы неупругим.

Теория упругих волн не требует такого деления и описывает этот процесс как цепочки процессов падения, отражения и преломления силовых импульсов. При этом, появляется возможность рассматривать как процесс внешнего взаимодействия шаров, так и процессы, проходящие внутри шаров.

Пример 2. Применение теории упругих волн позволяет так же рассматривать процессы, возникающие в объектах, воспринимающих динамические воздействия.

Так, например, рассмотрим взаимодействие подвижного состава и железнодорожного пути. Силовыми импульсами во времени для обеих конструкций являются импульсы на контактных площадках взаимодействия рельса и колеса. Существующие подходы для расчета взаимодействия подвижного состава и пути используют численные методы моделирования, при которых используются две независимые друг от друга модели: модель для расчета воздействия пути на подвижной состав и модель для расчета воздействия подвижного состава на путь. Однако при моделировании для каждой модели используются разные характеристики силовых импульсов. Это связано с тем, что в действительности нет четкой зависимости как конструкция каждого объекта влияет на его упруго-диссипативные свойства. Поэтому при моделировании воздействий на подвижной состав используют амплитудно-частотные зависимости, полученные в эксперименте, без привязки к конструкции, плану и профилю железнодорожного пути. А при моделировании воздействий на железнодорожный путь используют квазидинамические силы, без учета их изменения во времени. Кроме того, рассмотрение влияния продольных силовых импульсов от подвижного состава к конструкции железнодорожного пути, при расчете устойчивости конструкции бесстыкового пути, при изменении температурных режимов также отсутствует. Все это приводит к ограниченному использованию этих моделей в рамках задач, определяющих первое предельное состояние.

Поскольку теория упругих волн позволяет рассматривать как происходит процесс распространения внешнего силового импульса внутри

объекта во времени, это дает возможность, с помощью соотношения амплитуд процессов падения, отражения и преломления, охарактеризовать какая часть энергии затрачивается на деформативность внутри объектов (процесс отражения), и какая часть энергии переходит в другой объект как внешний импульс (процесс преломления). Поэтому применение теории упругих волн позволяет рассматривать процесс распространения силового импульса от взаимодействия колеса и рельса одновременно для обоих объектов (конструкции подвижного состава и конструкции пути). Что дает возможность учитывать изменения во времени характеристик колебаний всех элементов как конструкции подвижного состава, так и конструкции железнодорожного пути.

С целью оценки работы элементов конструкции железнодорожного пути в таблице 1 показана взаимосвязь между значениями коэффициентами поведения деформативности элементов и конструкции пути при различных скоростях движения. Для этого были рассчитаны амплитуды колебаний как для всех элементов конструкции пути, так и для самой конструкции пути. По значениям амплитуд и сил, имеющих место для каждого элемента пути за время действия на него силового импульса, были определены значения их деформативной работы (A_p) и интенсивности использования элемента и конструкции (I_p как отношение величины работы ко времени действия силового воздействия). Далее за эталон были приняты показатели для скорости движения 10 км/час и получены коэффициенты поведения деформативности.

По результатам анализа данных, приведенным в табл. 1, при более низких скоростях движения значения амплитуд конструкции пути и времени воздействия силового импульса превышают аналогичные значения при более высоких скоростях движения, но длина пути, воспринимающего нагрузку, меньше. Это приводит к различным соотношениям поведения деформативности при различных скоростях движения. Оценка интенсивности работы конструкции и элементов за время действия силового импульса характеризует интенсивность работы конструкции и элементов при различных скоростях движения. Увеличение скоростей движения приводит к увеличению интенсивности использования рельсовых прокладок и щебня за счет увеличения длины участка конструкции пути, воспринимающей силовой импульс, на фоне общего снижения восприятия силового импульса земляным полотном.

**Коэффициенты поведения деформативности
при различных скоростях движения подвижного состава**

Скорость, км/час	конструкция	прокладка	шпала	балласт	земляное полотно
$A_V / A_{V=10}$					
10	1	1	1	1	1
30	0,17	0,18	0,09	0,469	0,134
60	0,03	0,08	0,03	0,121	0,044
90	0,02	0,07	0,02	0,055	0,025
120	0,01	0,06	0,01	0,044	0,018
$I_V / I_{V=10}$					
10	1	1	1	1	1
30	0,487	0,513	0,255	1,088	0,391
60	0,159	0,498	0,159	0,679	0,245
90	0,141	0,565	0,129	0,444	0,202
120	0,133	0,655	0,117	0,466	0,184

В таблице 2 показана взаимосвязь между значениями коэффициентов поведения деформативности элементов и конструкции пути при различных значениях силового импульса.

По результатам анализа данных, приведенных в табл. 2, железнодорожный путь под воздействием подвижного состава с силовым импульсом 225 кН, выполняет меньшую работу, чем путь с силовым импульсом 294 кН и 450 кН соответственно в 2,34 и 7,29 раза. Интенсивность использования элементов и конструкции пути с силовым импульсом 225 кН меньше, чем с силовым 294 кН и 450 кН соответственно в 2,23 и 5,15 раза. Это позволяет установить взаимосвязи динамики подвижного состава и интенсивности использования элементов железнодорожного пути.

Основным преимуществом в данном способе описания процессов распространения силовых импульсов является возможность исследовать влияние как геометрии конструкции каждого элемента, так и состояния материала каждого элемента конструкции пути на работу самой конструкции пути.

**Коэффициенты поведения деформативности
при различных воздействиях подвижного состава**

Объект	Силовой импульс		
	225 кН	294 кН	450 кН
$A_F / A_{F=225}$			
конструкция пути	1	2,34	7,63
прокладка	1	2,25	7,03
шпала	1	2,19	6,83
балласт	1	2,43	8,13
земляное полотно	1	2,48	6,85
$I_F / I_{F=225}$			
конструкция пути	1	2,13	6,02
прокладка	1	2,06	5,57
шпала	1	2,00	5,38
балласт	1	2,73	7,7
земляное полотно	1	2,25	6,63

Пример 3. Еще одно преимущество использования теории упругих волн состоит в том, что описание процесса распространения внутри объектов позволяет использование первого закона термодинамики, согласно которому для любого объема верно:

$$\delta K(t) + \delta U(t) + \delta A(t) = \delta Q(t) \quad (2)$$

где $\delta K(t)$ – изменение кинетической энергии объекта в любой локации его объема во времени;

$\delta U(t)$ – изменение внутренней энергии объекта в любой локации его объема во времени;

$\delta A(t)$ – изменение работы внешних сил;

$\delta Q(t)$ – изменение тепловой энергии в любой локации объекта во времени.

Физико-механические характеристики материала объекта определяют наличие видов волн, так, например, в твердых телах возникают как продольные, так и поперечные волны, а в жидкостях или газах только продольные, естественно если в них нет твердых включений. Например, в рельсах, выполненных из стали и железобетонных шпа-

лах под воздействием силового импульса, возникают как продольные волны, так и поперечные, в то время как в деревянных шпалах распространяются только продольные волны.

Для сравнения работоспособности разных материалов используется понятие энергии абсорбции (энергии разрушения). Но эта энергия зависит от процесса деформативности. Так, например, часть рельса в межшпальном пространстве передает силовой импульс воздуху. Поскольку произведение плотности стали на скорость распространения волн в стали больше по значению чем та же характеристика в воздухе, то процесс отражения вызовет дополнительное растяжение рельса в направлении действия силовых волн процесса отражения, что обеспечит прогиб рельса в межшпальном ящике. Часть рельса, опирающегося на прокладку, так же вызовет прогиб рельса, но меньший, чем в межшпальном пространстве на величину разницы между амплитудами процессов отражения волн в полимерной прокладке и в воздухе. А вот в процессе отражения силовых волн в полимерной прокладке на контакте с железобетонной шпалой, отраженные волны будут сжимающими и противодействовать сжимающим силовым воздействиям преломленного процесса на контакте рельс-прокладка. В данном случае в полимерной прокладке происходит столкновение волн процесса падения и волн процесса отражения, что вызовет концентрацию деформации внутри прокладки на величину суперпозиции амплитуд, действующих во времени процессов падения и отражения, а также выброс количества теплоты на величину «компенсированной» (не реализованной в каждом направлении) деформации.

Волновые процессы внутри объектов способствуют изменению расстояний между частицами материала. И это также позволяет рассматривать процессы непосредственного взаимодействия между частицами материала во времени, что расширит возможности прогнозирования появления усталостных накоплений в материале и появления дефектов.

5. Выводы

Использование теории упругих волн для описания динамических процессов позволяет:

– обеспечить аналитическое моделирование природных процессов внутри моделируемых объектов во времени;

- сформировать целостный подход к моделированию динамических процессов;
- дополнить описание силовых импульсов такой характеристикой, как закон изменения силового импульса во времени;
- расширить использование второго закона движения и применить во времени первый закон термодинамики;
- детализировать условия эксплуатации и учитывать конструктивные, технические и технологические особенности эксплуатации различных объектов;

Поскольку предложенный подход позволяет корректно описывать физические процессы, протекающие внутри элементов во времени, это позволяет управлять функциональной безопасностью объектов техносферы предлагая инновационный подход к созданию комфортного среды обитания людей, путем:

- моделирования пространственно-временных процессов, происходящих как внутри каждого элемента конструкции, так и в конструкции в целом под действием как внешних, так и внутренних воздействий;
- модификации моделей путем изменения геометрических и физико-механических характеристик конструкции для определенных условий эксплуатации;
- оптимизации рисков, связанных с проведением неудачных испытаний;
- контроля параметров деформативности в динамических процессах;
- расширения существующих методов диагностики динамических систем;
- оптимизации затрат на изготовление и эксплуатацию объектов моделирования, а также прогнозирование повреждений при продолжении эксплуатации.

Это позволяет оптимизировать объекты, модифицируя их конструкцию, свойства материалов объектов, технологию обслуживания под конкретные условия эксплуатации. Все это способствует повышению конкурентоспособности объектов в целом. Поскольку можно использовать закон сохранения импульса как для отдельных объектов, так и для их частей, использование целостного подхода позволяет обратиться к системам, ранее считавшимся открытыми.

Список литературы:

1. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд, наказ Міністерства будівництва України від 02.08.2018, № 198. Київ: 33.
2. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. Москва : «Наука», 1981. 480 с.
3. Bondarenko I. Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6. Iss. 7(84). P. 28–36. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85464>
4. Bondarenko I. O., Neduzha L. O. Investigation of the Influence of the Rolling Stock Dynamics on the Intensity of Using the Railway Track Elements. *Science and Transport Progress*. 2019. № 4. P. 61–73. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2019/176661>
5. Хютте Т. П. Справочник для инженеров, техников и студентов. Том 1, издание 15-ое. Ленинград : Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1934. 1003 с.

References:

1. DBN V.1.2-14:2018 Zagaljni pryncypy zabezpechennja nadijnosti ta konstruktyvnoji bezpeky budivelj i sporud, nakaz Minreghionu vid 02.08.2018, 198, Kyiv: 33. (in Ukrainian)
2. Javorskij B. M., Pinskij A. A. (1981) Osnovy fiziki. T. 1. Mehanika. Molekuljarnaja fizika. Jelektrodinamika. Moscow: «Nauka», p. 480. (in Russian)
3. Bondarenko I. (2016) Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, iss. 7(84), pp. 28–36. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85464> (in Ukrainian)
4. Bondarenko I. O., Neduzha L. O. (2019) Investigation of the Influence of the Rolling Stock Dynamics on the Intensity of Using the Railway Track Elements. *Science and Transport Progress*, vol. 4, pp. 61–73. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2019/176661> (in Ukrainian)
5. Hjutte T. P. (1934) Spravochnik dlja inzhenerov, tehnikov i studentov, t. 1, izdanie 15-oe. Leningrad: Izd-vo ONTI NKTP SSSR, p. 1003. (in Russian)