

INFORMATION SYSTEM OF CONTINUOUS SUPPORT FOR EQUIPMENT OF FOOD AND CHEMICAL INDUSTRIES

A. Kopylenko, O. Gondlyach, A. Timonin, V. Onopriyenko, P. Nikitin
National University of Food Technologies

Key words:

Equipment

Defect

Wave shift

Method of variable rigidity

Multi-layered system

Article history:

Received 18.07.2014

Received in revised form
12.08.2014

Accepted 18.08.2014

Corresponding author:

A. Kopylenko

E-mail:

npnuht@ukr.net

ABSTRACT

A system of continuous information support for equipment of food and chemical industries has been developed on the basis of APROX system for strength calculation. An algorithm of modeling the process of multilayer spatial structures destruction due to seismic loads based on iterative-analytical theory has been proposed. The algorithm was tested by solving model and application tasks. The results of the analysis of natural frequencies and modes of a bimetallic distillation column are presented and the process of development of the main crack under seismic effects is reproduced. Project design recommendations for such devices are proposed on the basis of performed calculations.

СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ І ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

А.В. Копиленко, О.В. Гондляр, А.Н. Тимонін, В.Ю. Онопрієнко, Р.Е. Нікітін
Національний університет харчових технологій

У статті на основі системи для розрахунків на міцність АПРОКС створено систему безперервної інформаційної підтримки обладнання харчової та хімічної промисловості. Завдяки використанню ітераційно-аналітичної теорії розроблено алгоритм моделювання процесу руйнування багатопарових просторових конструкцій від впливу сейсмічних навантажень. Алгоритм апробовано шляхом вирішення тестових і прикладних задач. Наведено результати аналізу власних частот і форм коливань біметалічної ректифікаційної колони й відтворено процес розвитку магістральної тріщини в умовах сейсмічних впливів. На основі виконаних розрахунків запропоновано проектно-конструкторські рекомендації щодо проектування таких апаратів.

Ключові слова: *обладнання, дефект, хвильові зрушення, метод змінних жорсткостей, багатопарові системи.*

Сложные условия эксплуатации машин и аппаратов пищевой и химической промышленности и выход их из строя влечет за собой не только большие ма-

териальные потери, существенные затраты на восстановление и ремонт, но и может причинить значительный вред окружающей среде и здоровью людей. В настоящий момент существенно ужесточаются требования, предъявляемые к созданию нового и усовершенствованию существующего оборудования пищевой и химической промышленностей для обеспечения необходимых условий реализации химико-технологических процессов. Основными причинами выхода из строя оборудования эксперты называют, прежде всего, возникновение и накопление в них дефектов, и лишь затем — отклонение от технологических норм эксплуатации и человеческий фактор. По статистике отказов аппаратов пищевой и химической промышленностей, более 94 % отказов происходит по причине развития дефектов и трещин.

Одним из факторов, которые могут повлечь за собой возникновение и развития дефектов и трещин в оборудовании химического и пищевого производства, может быть сейсмическое воздействие.

С точки зрения сейсмогеологии, землетрясения представляют собой силь-ные колебания грунта, происходящие благодаря высвобождению большого количества энергии в течение короткого промежутка времени при дислокациях внутри земной коры или верхней части мантии. Амплитуды сейсмических колебаний на поверхности сначала имеют небольшую величину, затем внезапно увеличиваются. Второй период процесса колебаний продолжается в течение определенного промежутка времени, после которого колебания постепенно затухают. Этот характер колебаний связан с тем, что внутри земной коры образуются два вида волн — первичные продольные волны (волны растяжения—сжатия) и вторичные поперечные волны (волны сдвига). Когда происходит освобождение энергии в гипоцентре землетрясения, эти волны возникают одновременно. Однако скорость распространения продольных волн больше и они раньше достигают пункта регистрации на земной поверхности. Начальная фаза колебаний целиком определяется этими волнами. Последующее появление поперечных и поверхностных волн характеризует основную фазу колебаний. Разрушительные землетрясения не ограничиваются одним колебательным возмущением. Обычно проявляется ряд последующих толчков [1,2].

По этой причине актуальным является вопрос разработки новых методов, применяемых при расчете и конструировании машин и аппаратов пищевой и химической промышленности с учетом эволюционных процессов накопления и распространения в них дефектов и трещин. Это позволит повысить показатели надежности и долговечности оборудования. В связи с этим, на кафедре ХПСМ НТУУ «КПИ» на базе программного комплекса АПРОКС разработана и апробирована объектно-ориентированная система непрерывной информационной поддержки жизненного цикла оборудования для ректификации и проведены исследования напряженно-деформированного состояния (НДС), собственных форм и частот колебаний, а также процесса разрушения ректификационной колонны.

С учетом особенностей сейсмических нагрузок представленная система позволяет выполнять расчеты на прочность для корректного определения компонент напряженно-деформированного состояния ректификационных колонн химической и пищевой промышленностей. На основании метода пе-

ременных жесткостей и метода дополнительных нагрузок реализован пошаговый алгоритм расчета данных конструкций для моделирования зарождения и развития магистральных трещин в этих ответственных сооружениях.

В качестве метода интегрирования уравнений движения используется метод конечных элементов [3]. Удачный выбор алгоритма и корректной конечно-элементной модели, как правило, приводит к получению столь же корректного решения при определении собственных форм колебаний однородных по толщине оболочечных конструкций.

Комплекс АПРОКС позволяет определять собственные формы колебаний исследуемых объектов методом конечных элементов с учетом основных положений итерационно-аналитической теории многослойных систем [4]. Все расчеты в работе выполнены, учитывая основные положения итерационно-аналитической теории, на основе которой специально разработан восьмиузловой, многослойный криволинейный конечный элемент (КЭ) с полилинейным законом восполнения функций перемещений [5].

Ректификационная колонна представляет собой аппарат цилиндрической формы с эллиптическими днищами двух диаметров: 3600 мм в нижней части и 2800 мм в верхней части. Общая высота колонны ректификации 40 м. Расчетная модель и чертеж колонны с габаритными размерами приведены на рис.1. Корпус колонны выполнен из биметаллической стали 16ГС + стали 08Х13 (25 + 3 мм). Колонна эксплуатируется при внутреннем давлении 0,9 МПа и при температуре 420°С. Физические свойства материала колоны таковы: сталь 16ГС — модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 300$ МПа; сталь 08Х13 — $E = 2,17 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_T = 280$ МПа, коэффициент Пуансона — 0,3 для обоих материалов [6].

С помощью объектно-ориентированной системы были определены динамические характеристики ректификационной колоны и её поведение вблизи низкочастотных источников колебаний. Проведены исследования по определению первых десяти форм частот собственных колебаний колоны (рис. 2).

Второй этап исследований заключается в моделировании аварийной ситуации, которая возникла вследствие сейсмического воздействия горизонтальной волны, продолжительностью действия 20 сек. Для определения внешних воздействий использована осциллограмма, приведенная на рис. 3.

Исследование распространения зон пластичности в материале слоев оболочки осуществлялось на основании теории пластического течения с трансляционным изотропным упрочнением. Численное интегрирование разрешающих уравнения движения конструкции во времени осуществляется либо с использованием метода Ньюмарка, либо метода центральных разностей.

В результате проведенных исследований установлена полная идентичность применения этих двух методов. Характерной особенностью адекватного описания изменения напряженно-деформированного состояния оболочки во времени, как показали результаты численных экспериментов, является необходимость учета (одновременно) двух нелинейных факторов (физической и геометрической нелинейности) для описания эволюционного процесса образования и распространения зон пластических деформаций во времени.

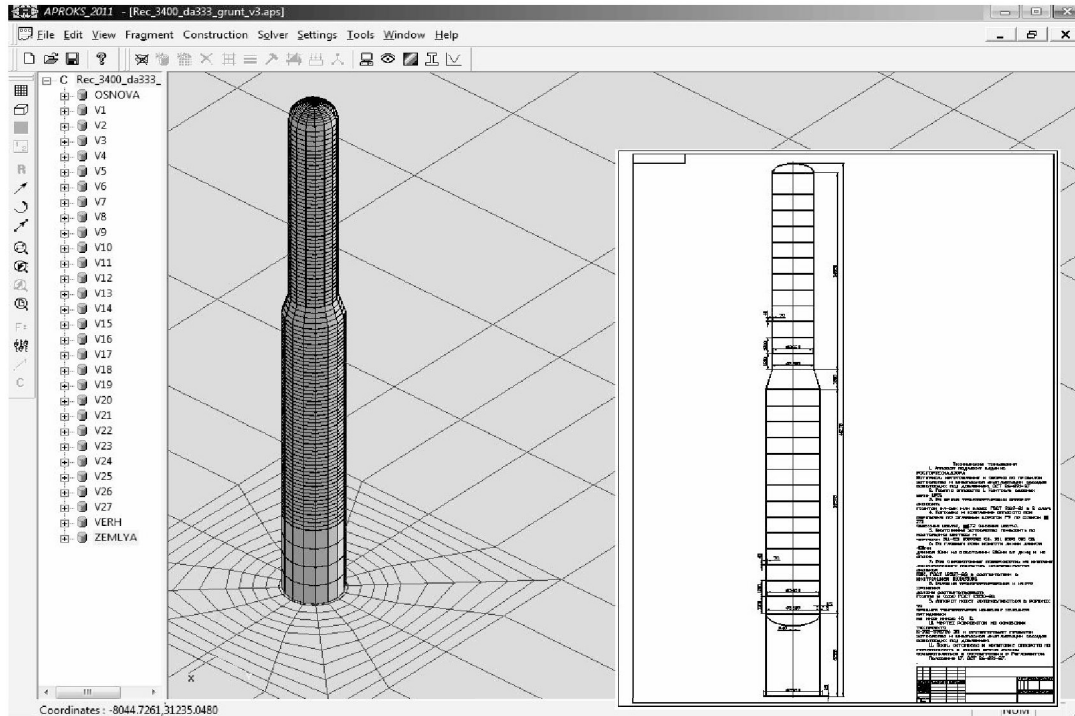


Рис. 1. Конечно-элементная модель колонны ректификации в системе АПРОКС

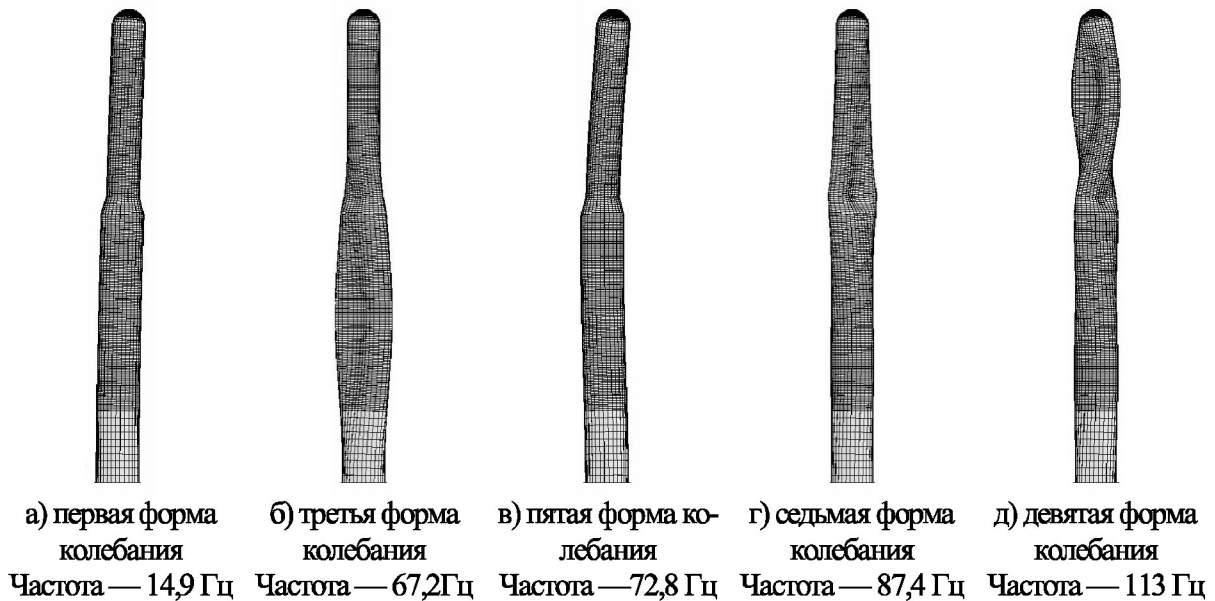


Рис. 2. Свободные формы и частоты колебаний ректификационной колонны

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что максимальные напряжения в исследуемой конструкции возникают в местах изменения геометрии колонны и в областях сварных швов.

Практика эксплуатации сварных биметаллических сосудов и аппаратов показала, что при нарушении технологии сварки в сварных швах возможно возникновение дефектов, которые могут вызвать разрушения конструкции. В [7] описан процесс разрушения корпуса колонны при проведении гидравлического испытания после ремонта отдельных участков сварных швов. Разрушение ректификационной колонны произошло при давлении 1,2 МПа, что значительно ниже, чем нормальное пробное давление испытания (2,8 МПа).

При этом образовалась трещина длиной ~ 6,6 м и шириной раскрытия до 120 мм [7].

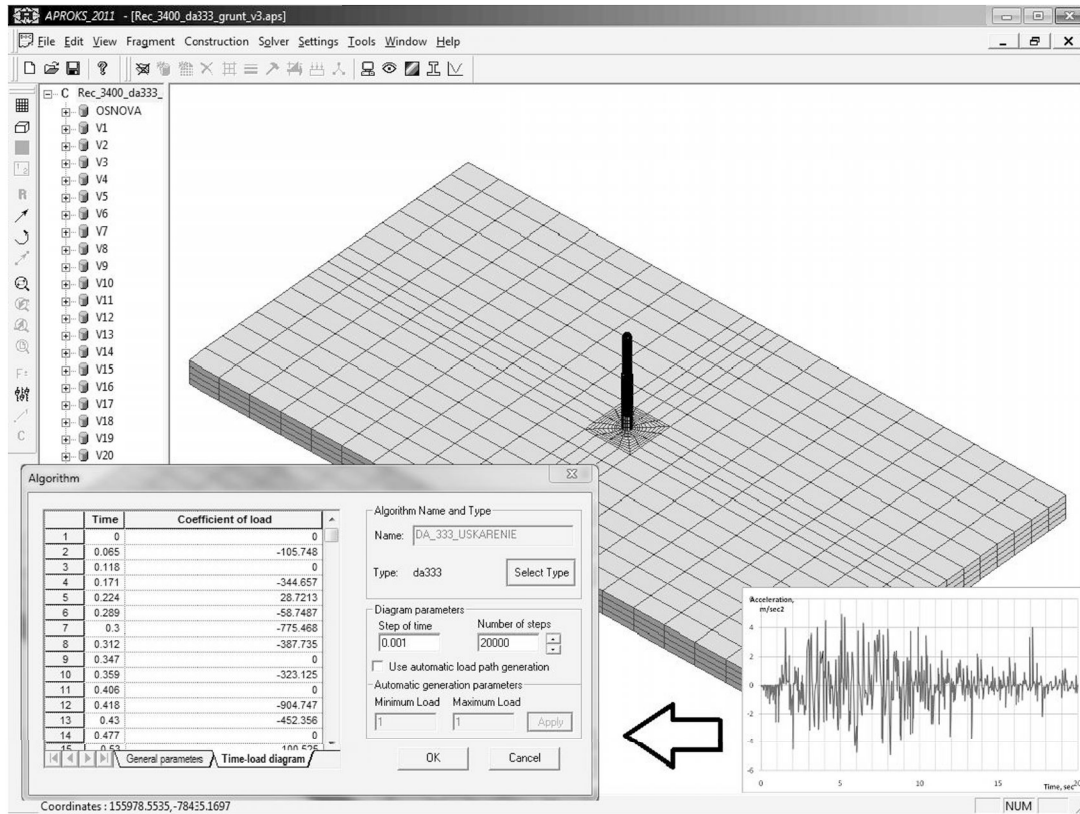


Рис. 3. Расчетная модель и алгоритм землетрясения

На базе системы непрерывной информационной поддержки ректификационной колонны выполнен ряд численных экспериментов для определения причин этой аварии [8]. Поскольку колонна изготовлена из пластических материалов, развитие трещины проходит не мгновенно, а в течение определенного времени. В данном случае моделирование процесса распространения трещины сводится к решению нелинейной задачи, предусматривающей одновременное решения двух проблем: 1) с какой скоростью будет распространяться трещина и 2) как будет варьироваться давление в колонне со временем.

Для определения расхода воздуха через трещину использовано соотношение, приведенное в [9]:

$$G = \frac{0,0404 \mu f p_1}{\sqrt{T_1}}, \text{ кг}$$

где μ — коэффициент расхода; f — площадь отверстия, м^2 ; p_1 — давление в колонне, Па; T_1 — температура воздуха, К.

Изменение давление газа в зависимости от времени представлено на рис. 5, где P_t — номинальное эксплуатационное давление (Па), P — действительное давление (Па), τ — время (с).

Эволюционные картины изменения напряженно-деформированного состояния ректификационной колонны во времени приведены на рис. 4.

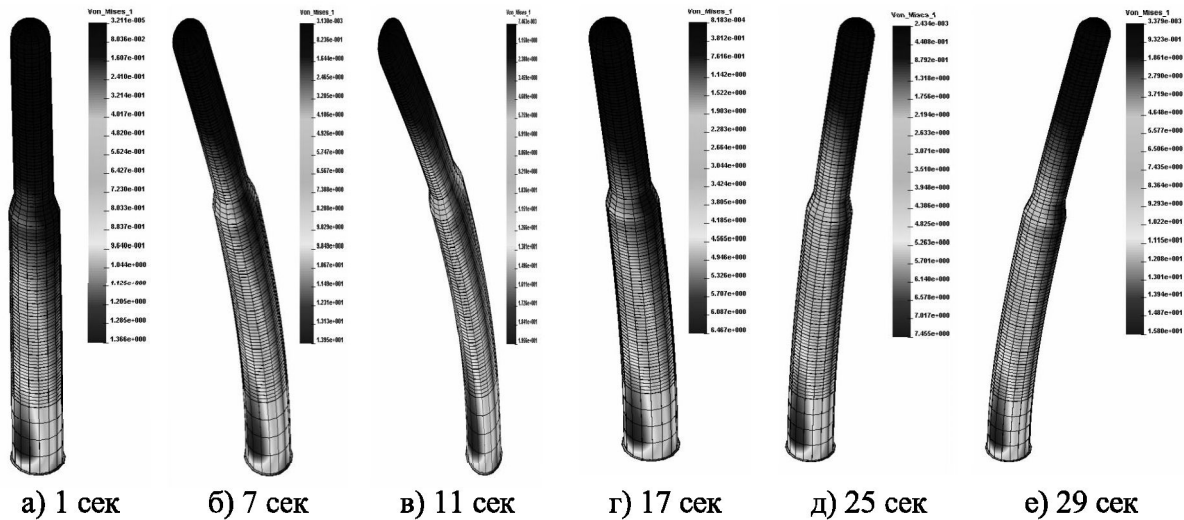


Рис. 4. Эволюция изменения напряженно-деформированного состояния ректификационной колонны во времени

Величина вектора перемещения, который характеризует величину раскрытия трещины, по окончании процесса ее развития в 5 раз превышает толщину стенки ректификационной колонны. В связи с наличием остаточных деформаций, численное моделирование данного процесса необходимо проводить в физически и геометрически нелинейной постановке, поэтому при использовании системы для расчета на прочность АПРОКС применялся алгоритм, который состоит из трех основных блоков:

- 1) блок пошагового изменения условий нагружения во времени (с момента образования начальной трещины до момента равенства внутреннего давления атмосферному);
- 2) блок метода переменных жесткостей (для моделирования распространения во времени зон пластических деформаций материала слоев колонны);
- 3) блок дополнительных нагрузок (для моделирования геометрически нелинейного деформирования конструкции).

В результате численного моделирования было установлено, что при заданных начальных условиях давления и величине раскрытия трещины 120 мм, при общей длине разрушения 6,6 м, которые были зафиксированные после аварии колонны, средняя скорость распространения трещины равна 0,6 м / с.

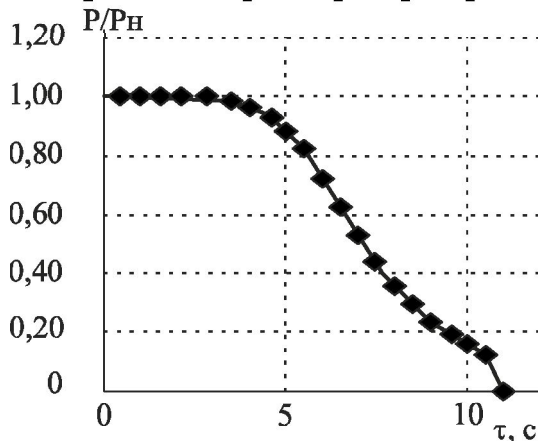


Рис. 5. Изменение давления газа в зависимости от времени

Численное моделирование этого процесса позволило определить не только количественные параметры разрушения, такие как скорость распространения трещины, но и выяснить основные этапы ее эволюционного развития.

Так, при большем давлении увеличивается параметр ширины раскрытия трещины, который изменяется в соответствии с экспоненциальным законом (рис. 6, а). В дальнейшем за счет падения внут-

ренного давления происходит замедление параметров роста ширины раскрытия трещины, и после достижения максимального раскрытия (рис. 6, б), начинается процесс закрытия берегов трещины с соответствующим увеличением ее общей длины (рис.6, в). Конечный этап нелинейного процесса разрушения характеризуется полной остановкой движения устья трещины и постепенным уменьшением величины параметра ее раскрытия (рис.6, г). Этот процесс продолжается до момента полного падения давления в ректификационной колонне.

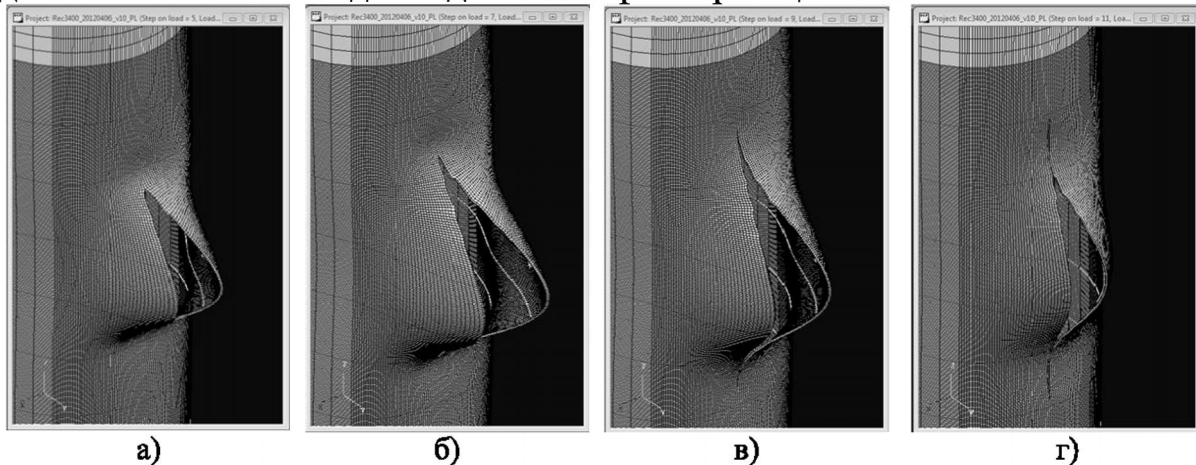


Рис. 6. Процесс распространения трещины в ректификационной колонне: а) бурный рост; б) максимальное раскрытие; в) расхождение берегов; г) деформированное состояние ректификационной колонны при нулевом давлении

В результате выполненных расчетов получен график зависимости величины раскрытия трещины от давления, который приведен на (рис. 7). Для подтверждения достоверности результата численного моделирования процесса разрушения уменьшен шаг движения трещины во времени. Анализ (рис.8) свидетельствует о действительной сходимости результатов (кривая с кружком отвечает приросту интервала по времени 0,5 с. Кривая с квадратиком отвечает приросту интервала по времени 1 с.).

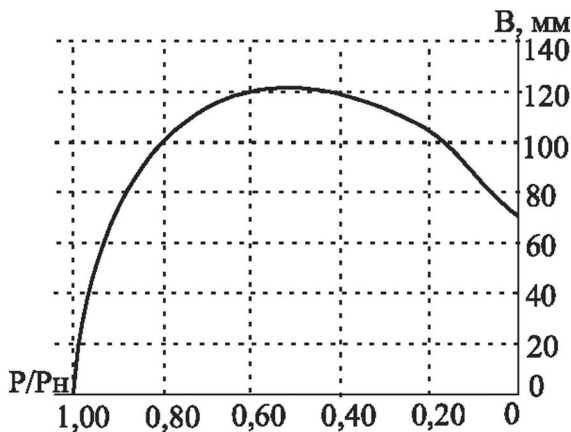


Рис. 7. Зависимость величины раскрытия трещины от внутреннего давления

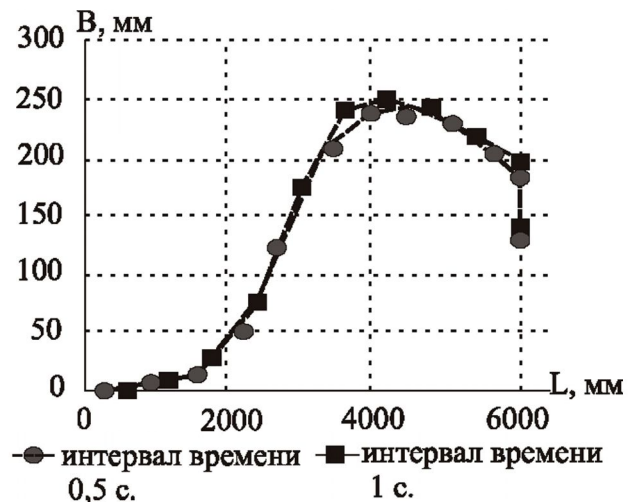


Рис. 8. Изменение величины раскрытия трещины в зависимости от ее длины

Выводы

Проведенные исследования показали, что при численном воспроизведении процесса разрушения биметаллической ректификационной колонны результаты отличаются не более, чем на 10% по величине остаточного раскрытия трещины. Это свидетельствует о том, что основные факторы разработанной математической модели по распространению трещин в ректификационной колонне учтены верно, а система информационной поддержки оборудования химического комплекса может быть рекомендована к практическому внедрению в производство.

Литература

1. *Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии. — М.: Гос. изд-во техн.- теорет. литературы, 1995.
2. *Пучков С.В.* Закономерности колебаний грунта при землетрясении. — М.: Изд-во Наука, 1974. — 120 с.
3. *Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под общ. ред. Сахарова А.С. и Альтенбаха И.* — К.: Вища школа. 1982. — 480 с.
4. *Сахаров А.С. и др.* Метод конечных элементов в механике твердых тел. — К.: Вища школа, 1982. — 480 с.
5. *Гондлях А.В.* Уточненный многослойный конечный элемент пользователя для моделирования в среде ABAQUS нелинейных процессов деформирования и разрушения композитных пространственных систем. Инженерные системы: Труды международного форума. Инжиниринговая компания «ТЕСИС». — М.: МАКС Пресс, 2012. — 224 с.
6. *Мухин В.Н., Ватник Л.Е.*: Исследование причин хрупких разрушений биметаллических аппаратов // НТРС «Эксплуатация оборудования». — 1983. — № 1. — С. 3—7.
7. *Мухин В.Н., Самохин Ю.Н., Гришин А.В.* Особенности экспертизы промышленной безопасности биметаллических сосудов и аппаратов // Химическая техника. — 2010. — № 5. — С. 20—24.
8. *Гондлях О.В., Никитин Р.Е.* Чисельне відтворення процесу руйнування біметаєвої ректифікаційної колони. Збірник доповідей науково-практичної конференції студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». — К.: Січкара, 2012. — 120 с.
9. *Герц В.* Пневматические устройства и системы в машиностроении. Справочник. — М.: Машиностроение, 1981. — 408 с.

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.В. Копыленко, О.В. Гондлях, А.Н. Тимонин, В.Ю. Оноприенко, Р.Е. Никитин
Национальный университет пищевых технологий

В статье на основании системы для расчетов на прочность АПРОКС создана система непрерывной информационной поддержки оборудования пищевой и хи-

мической промышленности. С использованием итерационно-аналитической теории разработан алгоритм моделирования процесса разрушения многослойных пространственных конструкций от воздействия сейсмических нагрузок. Алгоритм апробирован путем решения тестовых и прикладных задач. Приведены результаты анализа собственных частот и форм колебаний биметаллической ректификационной колоны и воспроизведен процесс развития магистральной трещины в условиях сейсмических воздействий. На основе выполненных расчетов предложены проектно-конструкторские рекомендации по проектированию подобного рода аппаратов.

Ключевые слова: *оборудование, дефект, волновой сдвиг, метод переменных жесткостей, многослойные системы.*