

А.Н. Домрачев, С.В. Риб

Сибирский государственный индустриальный университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ИЗ БЕТОННЫХ БЛОКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ

В зарубежной практике для быстрого возведения шахтных перемычек достаточно распространенным является использование бетонных блоков в сочетании с различными средствами механизации их укладки [1 – 3]. Для оценки способности такой конструкции сопротивляться воздействию ударной воздушной волны (УВВ) было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния блочных перемычек с использованием метода конечных элементов [4, 5] при статическом давлении 0,3 МПа. Для выполнения расчетов использован программный комплекс Auroga Z88 [6, 7] с соответствующей моделью перемычки. В качестве объемного конечного элемента принят hexahedron (шестигранник) № 1, который обеспечивает вычисление деформации и напряжения в пространстве, используя линейные функции формы (linear shape functions). Этот элемент является трансформируемым, следовательно, он может иметь форму клина или даже косоугольную форму. Трансформация является изопараметрической. В основе модели перемычки лежит ее разделение на элементы, представленные двумя типами материалов – бетоном (тело боков) и раствором, заполняющим межблочные швы (рис. 1).

Для упрощения моделирования укладка блоков выполнена в один ряд без перевязки (зигзагообразного расположения) швов. Скрепление блоков с кровлей, почвой и боками выработки осуществляется путем заполнения пустот цементным раствором; для упрощения выполнения моделирования вруб отсутствует, а точки контакта раствора и массива по периметру перемычки рассматриваются как жесткое закрепление с нулевым возможным смещением. Размер блока принят равным 270×300×470 мм, что примерно соответствует типовому блоку Concrete block seal или Omega block seal (США) [2, 3]. Так как перемычка имеет трапециевидную форму, было принято допущение о возможности обработки (обтесывания, подрубки) отдельных бетонных блоков без изменения их прочностных свойств.

При выполнении моделирования использование процедуры meshing признано нецелесообразным, так как эта процедура «размывает» картину напряжений и затрудняет рассмотрение каждого блока как отдельной структурной единицы перемычки. Структура и элементный состав перемычки приведены на рис. 2, результаты моделирования – на рис. 3 и 4.

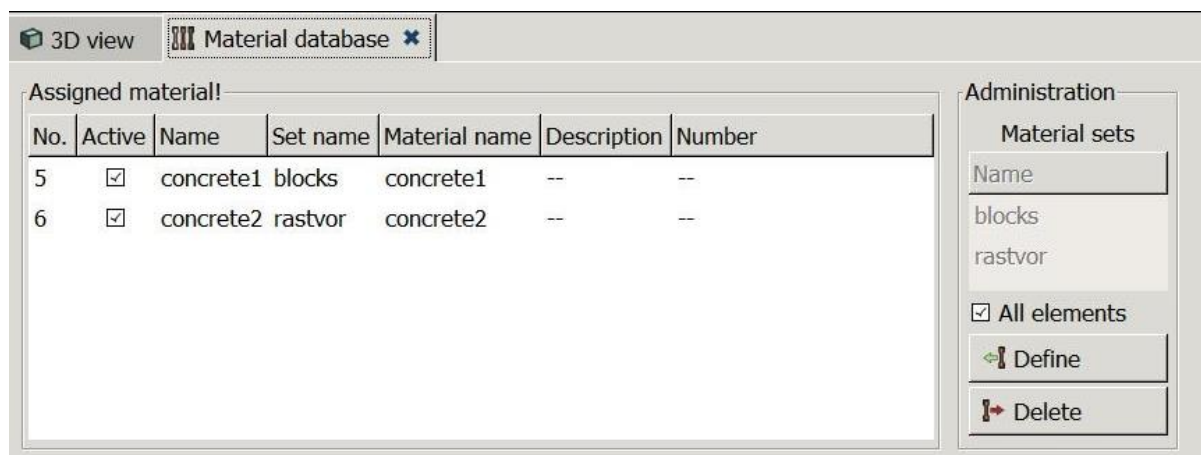


Рис. 1. Представление перемычки путем разделения элементов по типу материала

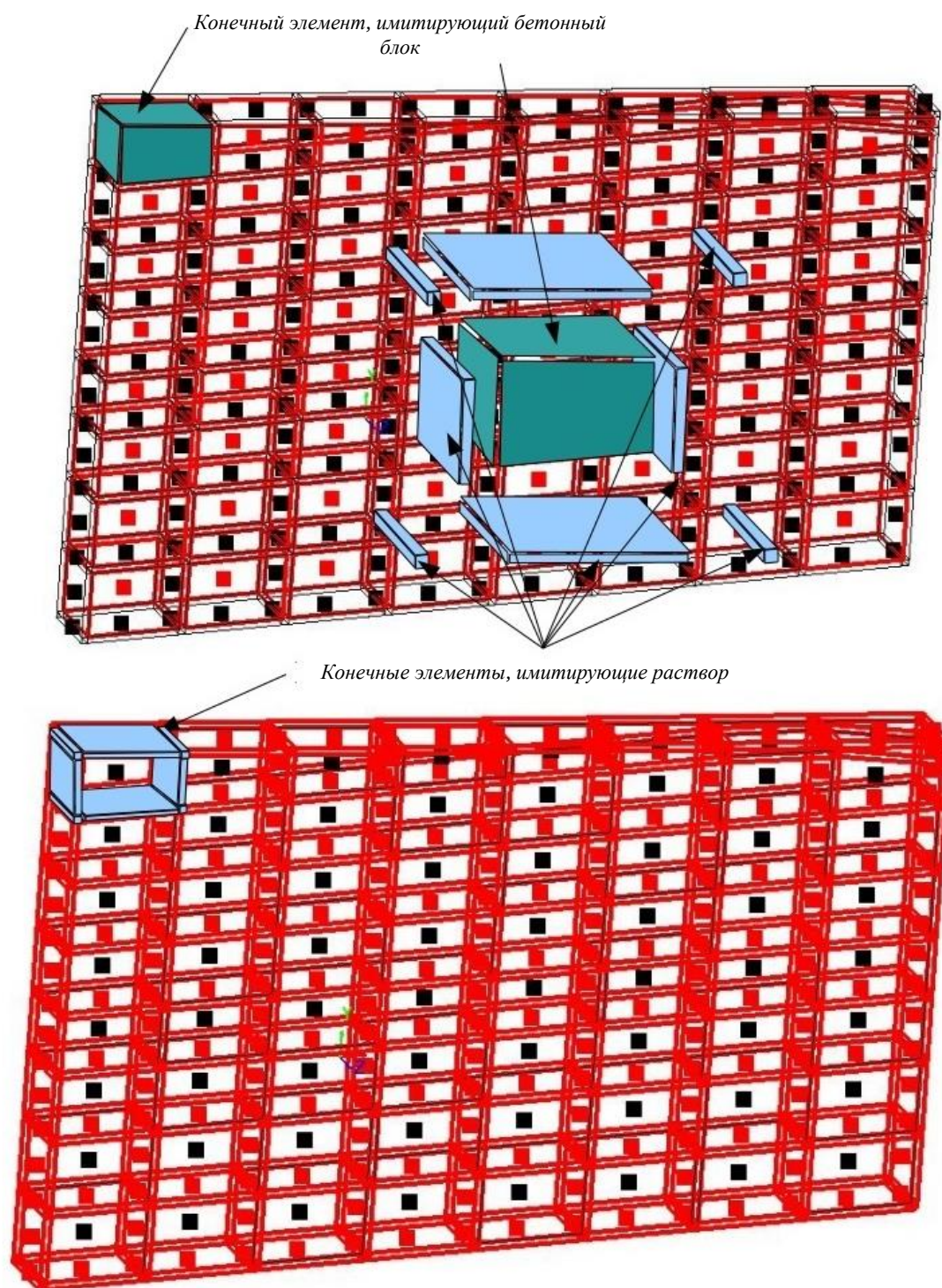


Рис. 2. Схема представления перемычки из бетонных блоков для моделирования воздействия УВВ методом конечных элементов

Согласно рис. 3, наибольшие смещения наблюдались в центральной части перемычки. По аналогии с распределением смещений наибольшие напряжения наблюдаются по центру верхней и нижней частей периметра перемычки, несколько меньшие – по центру линий контакта с боковыми породами (рис. 3). Если рассматривать напряжения, возникающие в отдельных блоках, то в целом картина распределения напряжений остается аналогичной,

т.е. более всего нагружены блоки в центре и в середине контактных линий, ограничивающих периметр перемычки (рис. 4).

В зарубежной практике для повышения прочности перемычек из бетонных блоков широко используются центральные пилястры, однако полученное в результате моделирования распределение напряжений не позволяет сделать однозначного заключения об их возможной эффективности.

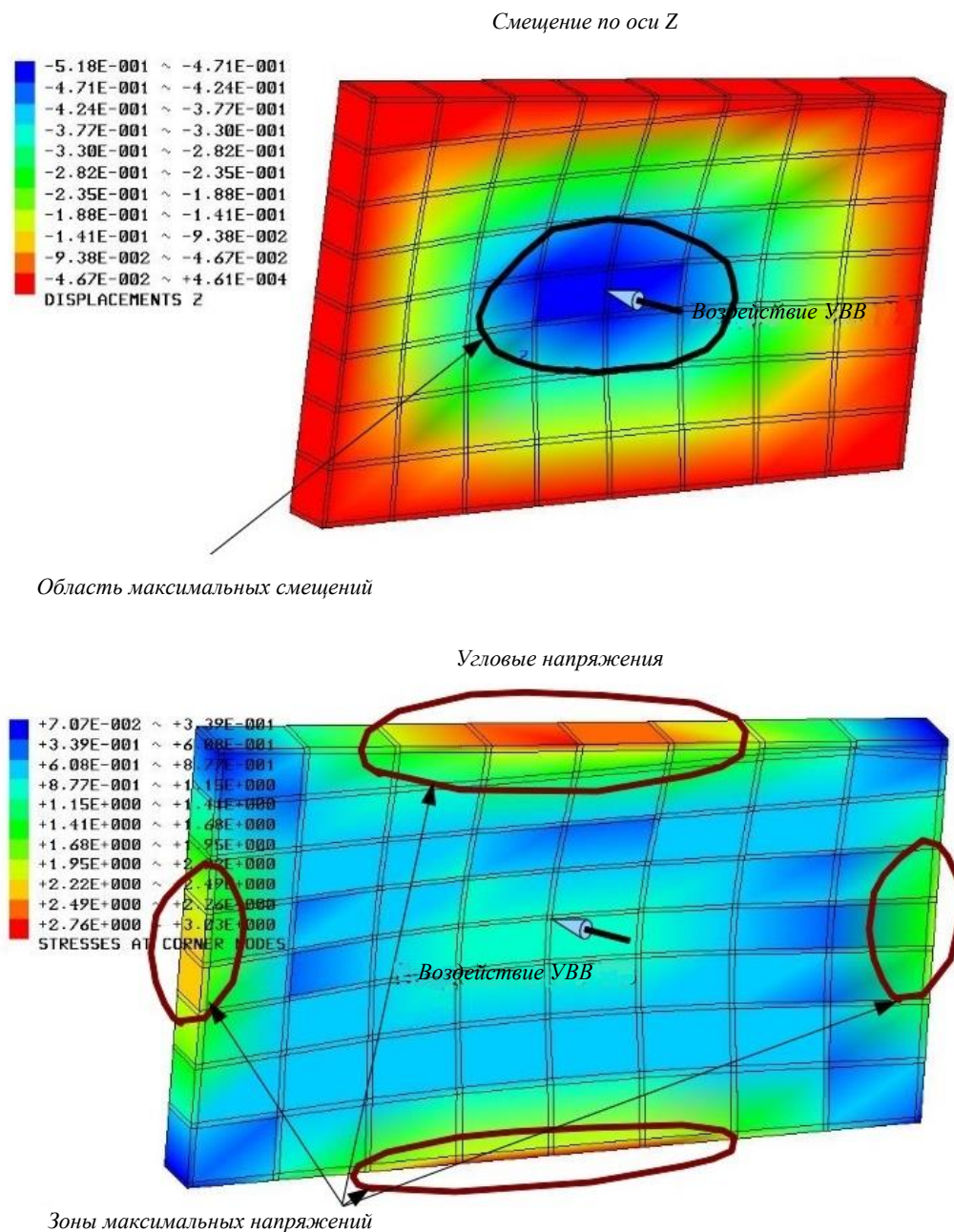


Рис. 3. Результаты моделирования воздействия УВВ на перемычку из бетонных блоков

Повышение устойчивости может быть достигнуто за счет закрепления анкерами, забуренными в массив и заделанными в тело перемычки (в блоки) там, где проявляются наибольшие напряжения.

Все вышеизложенное позволяет сделать предварительный вывод о нецелесообразности использования перемычек из бетонных блоков в качестве взрывоустойчивых, даже при увеличении их толщины за счет выкладки нескольких рядов или изменения направления укладки блоков. Кроме того, увеличение числа блоков может привести к росту продолжительности возведения перемычки, что лишает

эту конструкцию одного из наиболее существенных преимуществ.

Определенный интерес может представлять использование перемычки из бетонных блоков в качестве быстровозводимой опалубки для бетонных перемычек, когда опалубка и «тело» перемычки рассматриваются как единое целое. Такой подход позволит уменьшить толщину бетонной перемычки и несколько сократить время ее возведения. Для детальной оценки эффективности подобного решения в дальнейшем рекомендуется выполнить моделирование перемычки смешанной конструкции с использованием метода конечных элементов.

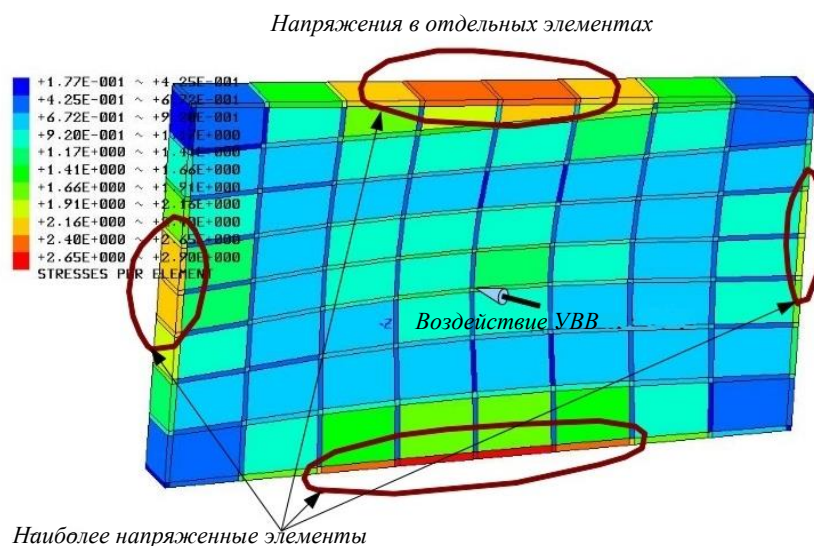


Рис. 4. Моделирование напряжений в отдельных блоках перемычки

Обобщая результаты моделирования, можно сделать следующие выводы. Программа Aurora Z88 показала себя как достаточно гибкий и эффективный инструмент моделирования напряженно-деформированного состояния перемычек при воздействии УВВ. В части методологии моделирования использование процедуры meshing позволяет увеличить число конечных элементов и формально повысить точность моделирования. Однако для перемычек из бетонных блоков оно признано нецелесообразным, так как «размывает» картину напряжений и затрудняет рассмотрение каждого бетонного блока как отдельной структурной единицы.

Наиболее сложным и трудоемким этапом моделирования (особенно в случае перемычки из бетонных блоков) является подготовка исходной «геометрической» модели перемычки и окружающего массива, и использование моделей (модифицируемых наборов данных) на основе табличных процессоров является только частичным решением проблемы. Подготовка данных средствами 3D-моделирования (в частности OpenSCAD) оказалось малоэффективной, так как при экспорте модели в формат *.stl не удастся сохранить разделение на фрагменты, которым позже могут быть заданы различные прочностные свойства. Решение проблемы может потребовать разработки специализированного программного комплекса на языке высокого уровня, который по исходным данным формировал (корректировал) бы детальный текстовый файл структуры модели, далее импортируемый в AutoCAD.

При выполнении расчетов воздействие УВВ представлялось в виде статической нагрузки (с пересчетом через коэффициент динамической

нагрузки (DLF), равный 2). Определение этого коэффициента представляет отдельную научную задачу, которая не решалась при выполнении проведенных исследований. Значительный интерес может представлять проверка полученных результатов с использованием альтернативного подхода (например, по критерию откольной прочности).

Сравнительная оценка прочности перемычек с врубом и безврубовых перемычек пока является весьма неоднозначной, так как закрепление безврубовой перемычки по периметру путем задания нулевых смещений в узлах контакта с массивом практически эквивалентно врубу; при этом имитация влияния адгезионной прочности путем задания отдельного слоя (набора элементов) с заданными свойствами является отдельной научной задачей, для решения которой может использоваться подход, основанный на использовании контактных элементов [8]. С другой стороны, имеет место быть задание ненулевых смещений в узлах контакта перемычки с массивом по периметру, полученных при решении двумерной задачи [9,10]. 2D-моделирование производится численным методом конечных элементов. Определяются смещения в окрестности горной выработки, которые потом являются граничными условиями на контактах перемычки и массива. В свою очередь существует сложность при оценке прочности перемычки из бетонных блоков, когда связь между блоком и раствором задается как жесткая, что не соответствует адгезионному сцеплению бетонных блоков и раствора, а также при моделировании напряженно-деформированного состояния бетонных перемычек, армированных стальным

прутком [11] (в части оценки связи между усиливающими элементами и телом перемычки).

Выводы. По результатам численного моделирования установлено, что шахтные перемычки из бетонных блоков не имеют явных преимуществ перед монолитными безврубными перемычками в условиях шахт России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. MSHA Approval Number: 120M-01.2 120-psi STRATACRETE Plug Seal Installation Manual (2006 г). – [Электронный ресурс] URL: www.msha.gov/Seals/Approved/120PSI/120M-14.0.pdf
2. Guide for SOLID CONCRETE BLOCK SEALS – 2006. – [Электронный ресурс] URL: www.msha.gov/Seals/SCBlockGuide.pdf
3. Guide for EXISTING ALTERNATIVE SEALS (Alternative Seals Built Prior to the Issuance of Program Information Bulletin (PIB) № P06-16, Dated July 19, 2006). – [Электронный ресурс] URL: www.msha.gov/Seals/ExistingAltGuide.pdf
4. Н о р р и Д., де Ф р и з Ж. Введение в метод конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
5. К л о в а н и ч С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. – Запорожье: Изд. «Світ геотехніки», 2009. – 400 с.
6. Z88 AURORA User Manual. – [Электронный ресурс] URL: [ftp://ftp.uni-bayreuth.de/pub/uni-bayreuth/LS-](http://ftp.uni-bayreuth.de/pub/uni-bayreuth/LS-CAD/Z88AuroraV1/manual_Z88AuroraV1/userguide.pdf)
7. Z88 AURORA Theory Manual. – [Электронный ресурс] URL: <http://www.z88.de/z88aurora/download/theoryguide.pdf>
8. Chen W.W. & Wang Q.J. (2008). A Numerical Model for the Point Contact of Dissimilar Materials Considering Tangential Tractions. *Mechanics of Materials*. Vol. 40. № 11, pp.936-948, ISSN: 0167-6636.
9. Р и б С.В., Б а с о в В.В. Методика подготовки исходных данных для решения двумерных задач численного моделирования неоднородных угольных целиков // Вестник СибГИУ, 2014. № 4 (10). С. 11 – 15.
10. Р и б С.В., Ф р я н о в В.Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для численного моделирования напряжённо-деформированного состояния неоднородных угольных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 367 – 372.
11. Д о м р а ч е в А.Н., С м ы ш л я е в С.А., Л е г а е в В.Р. Численное моделирование взаимодействия ударной воздушной волны с шахтными перемычками при использовании различных средств усиления // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. 2015. № 7.

© 2015 г. А.Н. Домрачев, С.В. Риб
Поступила 2 декабря 2015 г.