

УДК 532.543.3

А. М. Липанов, академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск
Н. В. Степанова, аспирант, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск
Л. В. Шишкина, кандидат физико-математических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА И ЖИДКОСТИ ПОСЛЕ ЧАСТИЧНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЛОТИНЫ

Представлены результаты моделирования свободной поверхности жидкости после частичного разрушения плотины, полученные при решении системы уравнений Навье – Стокса с помощью метода конечных разностей. Выявлены параметры, влияющие на развитие процесса образования прорывной волны.

Ключевые слова: система уравнений Навье – Стокса, течение со свободной поверхностью, волновые явления на поверхности.

Приведем результаты численного моделирования процесса истечения жидкости после частичного разрушения плотины (разрушения у дна плотины). Рассмотрим случаи формирования прерывной волны в результате частичного разрушения плотины при значении вертикальной составляющей скорости, равной нулю и равной отрицательному значению, при этом в качестве исходных данных принимаем данные, использованные при постановке эксперимента.

Рассматривались случаи формирования прорывной волны в результате частичного разрушения плотины при значении вертикальной составляющей скорости, равной нулю и равной отрицательному значению.

На рис. 1–4 для трех моментов времени ($t = 10^{-7}$, $1,5 \cdot 10^{-6}$ и $5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.) приведены результаты расчетов основных параметров, влияющих на процесс истечения жидкости после частичного разрушения плотины, а именно: давления, температуры, горизонтальной и вертикальной составляющих скорости.

Уровень воды в верхнем бьефе составляет $H_{в.б} = 0,22$ м, а в нижнем бьефе – $H_{н.б} = 0,10$ м, при этом высота прорана составляет 0,02 м. Вертикальная составляющая скорости в момент разрушения плотины равна нулю, а горизонтальная составляющая скорости равна 1,97 м/с.

На рис. 1 представлено распределение давления в рассматриваемой области. Координата 0 по оси Oy соответствует дну канала. Видно, что давление в газовой фазе распределяется равномерно, а в воде нарастает согласно законам гидростатики. Свободная поверхность жидкости является линией изменения закона распределения давления. На этом рисунке хорошо видна точка подвода жидкости. Давление в этой точке соответствует гидростатическому давлению в верхнем бьефе плотины и остается постоянным на протяжении всего расчета.

На рис. 2 представлено распределение температуры по расчетной области. Следует отметить, что вблизи поверхности жидкости возникает максимум на распределении скорости, связанный, по-видимому, с тем, что в модели не учтена энергия, учиты-

вающая работу сил поверхностного натяжения. Кроме того в этой зоне должна происходить некоторая диссипация энергии за счет трения слоев сред, находящихся в разных агрегатных состояниях. Разность температур воды у донной поверхности верхнего и нижнего бьефов не учитывалась.

На рис. 3 и 4 представлены горизонтальная и вертикальная составляющие скорости. На графиках видно, что движение жидкости происходит не сразу по всему объему, а вначале только около места прорыва. Там входящий через отверстие поток тормозится о слой покоящейся в нижнем бьефе жидкости и разворачивается вверх, образуя на свободной поверхности волну прорыва. Около свободной поверхности жидкости в газовой фазе образуется вихрь, который должен влиять на характер изменения свободной поверхности жидкости вблизи стенки. Расположенные вдоль поверхности раздела фаз экстремумы возникают, видимо, по тем же причинам, что и на распределении температуры (см. рис. 3), то есть преимущественно из-за неучтенной силы поверхностного натяжения и значительно различающихся напряжений трения в разных фазах. Следует отметить также, что формирование вихря в газовой фазе происходит значительно быстрее, чем в воде благодаря меньшей инерционности среды.

На рис. 5, 6, 7, 8 для трех моментов времени ($t = 10^{-7}$, $1,5 \cdot 10^{-6}$ и $5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.) приведены результаты расчетов основных параметров, влияющих на процесс истечения жидкости после частичного разрушения плотины.

Уровень воды в верхнем бьефе плотины составляет $H_{в.б} = 0,22$ м, а в нижнем бьефе – $H_{н.б} = 0,10$ м, при этом разрушение плотины у дна составляет 0,02 м. Вертикальная составляющая скорости в момент разрушения плотины равна $-0,20$ м/с, а горизонтальная составляющая скорости равна 1,77 м/с.

Отклонение скорости потока в сторону дна помогает представить, как поведет себя поток, если при истечении будут создаваться условия для несовершенного сжатия (Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). Л. : Энергоиздат,

1982. 672 с.), которые при таком положении отверстия весьма вероятны. Предполагалось, что положение вихревой зоны в газовой фазе и гребня волны

при этом сместятся к выходному сечению. Однако это предположение не подтвердилось в силу неполного соответствия начальных условий расчетов.

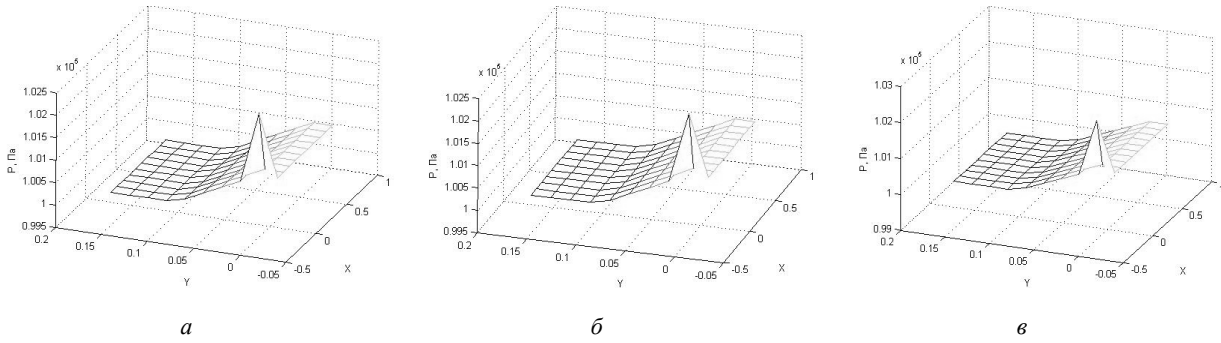


Рис. 1. Распределение давления в жидкой и газообразной средах: а - $t = 10^{-7}$ сек.; б - $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в - $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

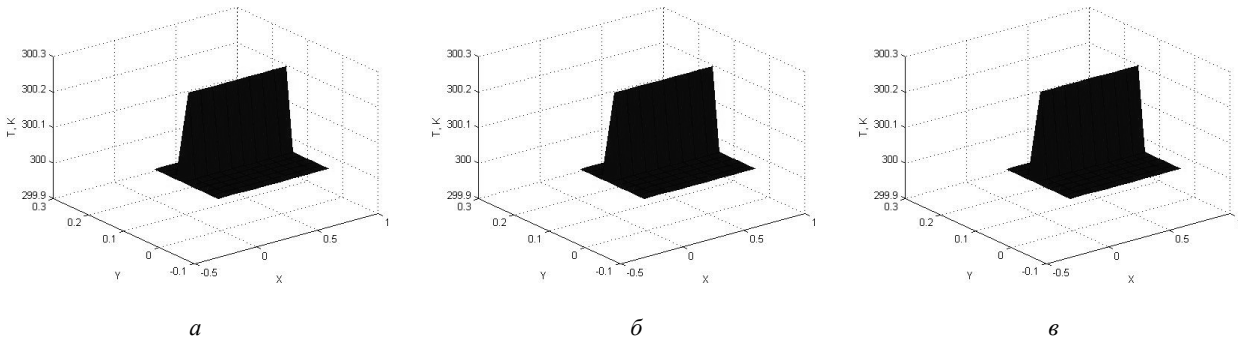


Рис. 2. Распределение температуры в жидкой и газообразной средах: а - $t = 10^{-7}$ сек.; б - $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в - $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

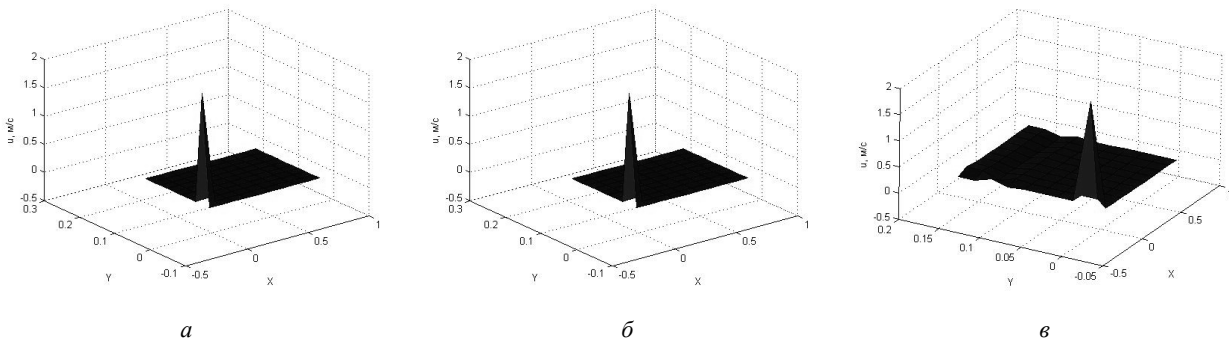


Рис. 3. Горизонтальная составляющая скорости: а - $t = 10^{-7}$ сек.; б - $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в - $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

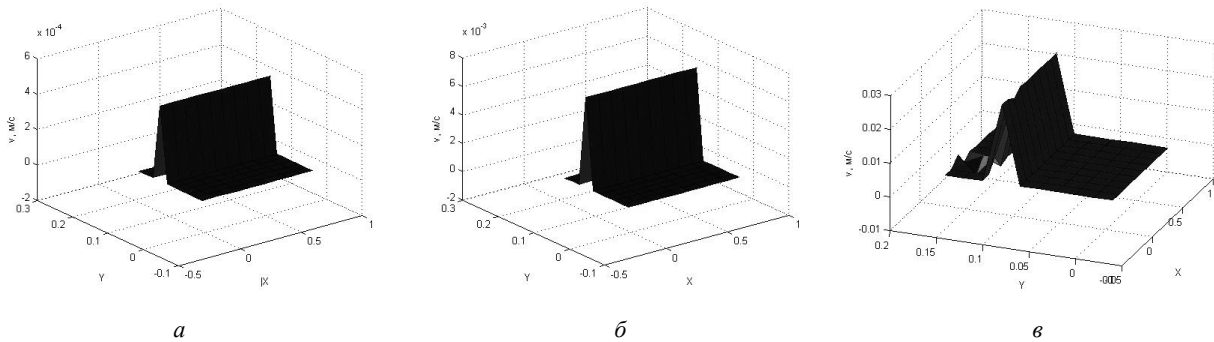


Рис. 4. Вертикальная составляющая скорости: а - $t = 10^{-7}$ сек.; б - $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в - $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

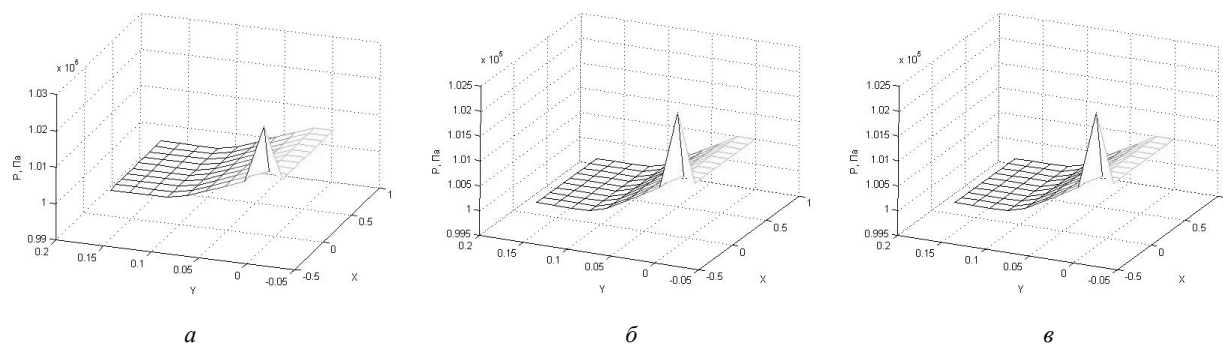


Рис. 5. Распределение давления в жидкой и газообразной средах: а – $t = 10^{-7}$ сек.; б – $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в – $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

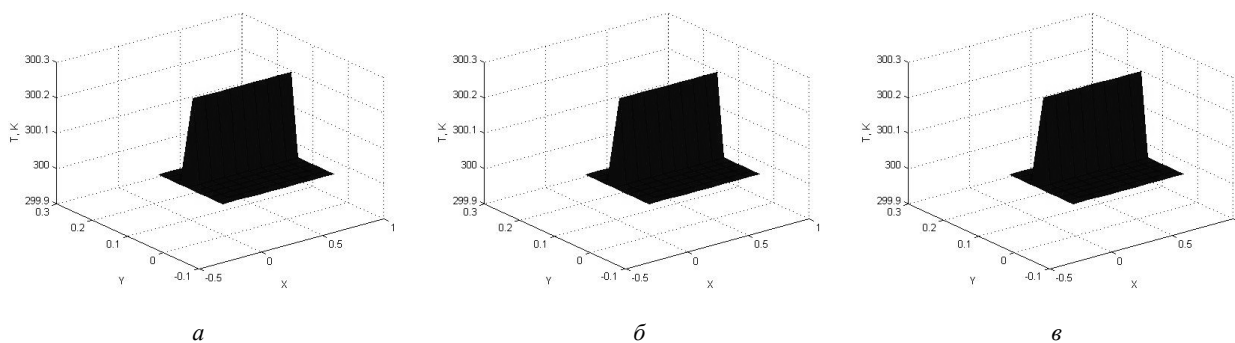


Рис. 6. Распределение температуры в жидкой и газообразной средах: а – $t = 10^{-7}$ сек.; б – $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в – $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

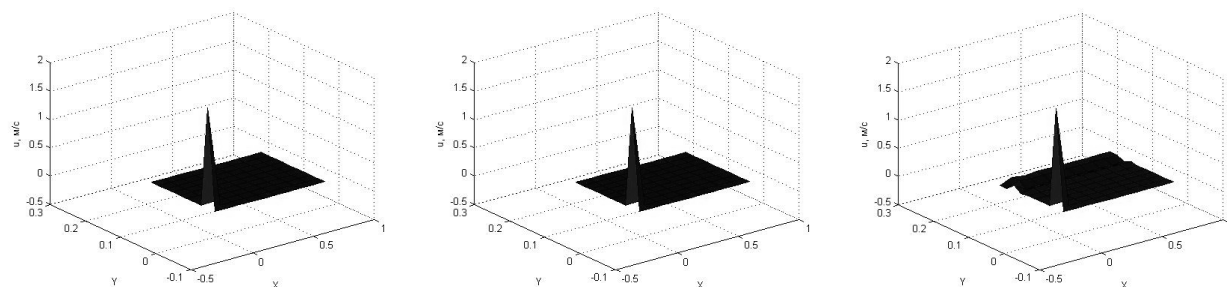


Рис. 7. Горизонтальная составляющая скорости: а – $t = 10^{-7}$ сек.; б – $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в – $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

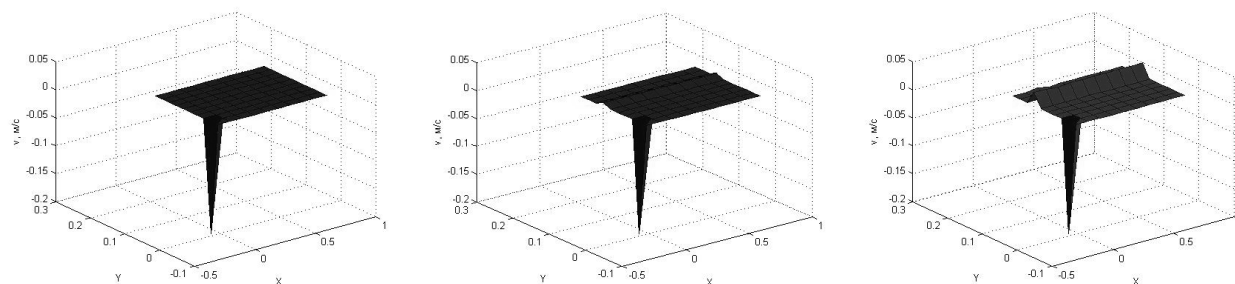


Рис. 8. Вертикальная составляющая скорости: а – $t = 10^{-7}$ сек.; б – $t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.; в – $t = 5,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

Статья написана на основе материалов, полученных при работе по проекту № 2.1.2/12726 «Разработка научно-технических основ моделирования течений жидкостей и газов при разрушении гидротехни-

ческого сооружения» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)».

A. M. Lipanov, Member of RAS, Institute of Applied Mechanics UB RAS, Izhevsk
N. V. Stepanova, Postgraduate Student, Institute of Applied Mechanics UB RAS, Izhevsk
L. V. Shishkina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Mathematical Modeling of Gas and Liquid Flow after Partial Dam Destruction. Part 1. Mathematical Problem

The results of free water surface modeling after partial dam destruction, obtained by solving the Navier-Stokes equations using finite difference method are presented. The parameters that influence on the development process of an outburst wave formation are found.

Key words: the Navier-Stokes equations, free-surface flow, surface wave effects.

УДК 621.9.048.4

В. Б. Дементьев, доктор технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

П. Г. Овчаренко, аспирант, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

А. Ю. Лещёв, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛЕЙ 45 И У8 НА ГЛУБИНУ ДО 10 ММ БОРИДАМИ ЖЕЛЕЗА ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Рассмотрен способ поверхностного легирования требуемых участков литых заготовок на заданную глубину. Способ осуществляется путем вставок тонких металлических пластин, предварительно подвергнутых борированию для увеличения их твердости, в модель из пенополистирола с постоянным шагом. При заливке моделей расплавом формируется легированный слой заданной глубины, обладающий высокой твердостью, обусловленной наличием в нем боридов железа.

Ключевые слова: легирование, борид железа, литье по газифицируемым моделям.

Развитие техники предъявляет все новые требования для обеспечения повышенных эксплуатационных свойств материалов на основе железа. Существуют различные способы получения заданных свойств стальных деталей, наиболее широко применяемые в промышленности, – способы химико-термической, термомеханической, электрофизической и других видов обработки [1, 2]. При изготовлении деталей различными способами литья широко применяются способы модифицирования [3] и объемного легирования расплавов для придания им требуемых свойств.

Особое место при получении стальных литых деталей занимают способы поверхностного и объемного легирования при литье по газифицируемым моделям. Способы поверхностного легирования осуществляются путем нанесения легирующих элементов в виде краски, пасты или пудры на поверхность модели из пенополистирола [4] либо введением легирующих элементов в состав антипригарного покрытия [5]. Способы объемного легирования сводятся к вдуванию порошкообразных легирующих элементов совместно с гранулами пенополистирола в пресс-форму на стадии изготовления моделей. У данных способов существуют неоспоримые преимущества, заключающиеся в том, что литые детали можно изготавливать высокой точности с обеспечением заданных свойств требуемым участкам поверхности либо объема отливок в зависимости от предъявляемых требований. Увеличение глубины легированных

слоев позволит существенно расширить номенклатуру изготавливаемых данными способами деталей, иметь гарантированный припуск на механическую обработку деталей, снизить расходы легирующих элементов и использовать более доступные и дешевые марки сталей, не уступающих по эксплуатационным характеристикам высоколегированным.

В данной работе исследуется возможность обеспечения повышенной твердости требуемым участкам поверхности литых стальных заготовок из различных марок стали на глубину до 10 мм с применением технологии литья по газифицируемым моделям.

Описание предлагаемого способа

Способ поверхностного легирования требуемых участков литых стальных заготовок на необходимую глубину при литье по газифицируемым моделям заключается в том, что в поверхность модели из пенополистирола вставляют тонкие (толщиной до 1 мм) металлические пластины, обладающие требуемыми свойствами, например, после соответствующей химико-термической обработки. В настоящей работе металлические пластины толщиной 0,2 мм предварительно подвергались борированию для увеличения их твердости. Толщина пластин подбиралась таким образом, чтобы за требуемое время борирования (6–8 часов) вся пластина приобрела высокую твердость и ее структуру составляли в основном бориды железа. Далее металлические пластины заданного размера вставляли в торец модели из пенополистирола, где были изготовлены пазы на глубину 10 мм от