

УДК 622.7

С.Л. Букин* (канд. техн. наук, доц.),
В.Ф. Комаров** (науч. сотр.), Р.А. Шолда* (аспирант),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»(*),
Донецкий национальный университет (**)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МЕЖРИФЕЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ДЕКИ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО СТОЛА

В работе предложена математическая модель движения жидкости в межрифельном пространстве деки концентрационного стола. С помощью данной модели проведено численное моделирование течений в межрифельном пространстве для различной геометрии нарифлений и случая ввода дополнительной подпитки.

Ключевые слова: математическая модель, гидродинамика, течение, жидкость, межрифельное пространство, дека, концентрационный стол.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Начиная с 60-х годов прошлого века предпринимались неоднократные попытки обогащения угольных шламов разнообразными методами: на винтовых и центробежных сепараторах, отсадочных машинах, гидросепараторах и др. В результате было установлено, что наиболее эффективным направлением обогащения угольных шламов является использование концентрационных столов [1-3]. Одним из основных недостатков концентрационных столов является невысокая удельная производительность, которая приводит к увеличению фронта концентрации на столах и, в конечном счете, увеличению себестоимости переработки шламов. Поэтому изыскание возможностей повышения удельной производительности концентрационных столов является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Исследованиям процессов обогащения на концентрационных столах посвящены работы П.В. Лященко, И.Н. Исаева, И.С. Благова, Г. Кирхберга, Б.В. Кизельвальтера, В.А. Волоченко, Н.Н. Виноградова и других исследователей. Однако к настоящему времени теория процесса разделения частиц на концентрационных столах разработана в недостаточной степени. Это объясняется тем, что математическое описание процесса представляет очень большие трудности [4].

В монографіях [5, 6] підведені ітоги теоретических і експериментальних досліджень предшественников, изучающих расслоение частиц разной плотности и размера в тонком слое воды, текущей по наклонной плоскости. Авторы утверждают, что процесс расслоения происходит от возвратно-поступательного движения деки, от смывного действия поперечного потока воды и турбулентного движения потока пульпы в межрифельном пространстве. И если по поводу первых двух причин процесса разделения многие авторы имеют общее мнение, то по вопросам влияния турбулентного потока на результаты расслоения их мнения расходятся. Большинство авторов склоняются к тому, что наличие рифлей на деке концентрационного стола вызывает появление двух потоков: верхнего, ламинарного и нижнего – турбулентного. Причем турбулентный характер движения жидкости при наличии разрыхленного материала создает восходящие потоки, которые способствуют лучшему расслаиванию материала по плотности и удаляют из слоя тяжелых минералов оставшиеся легкие частицы [5, 6]. Этому же мнению придерживаются и зарубежные исследователи [7].

Однако в ряде работ, например, в работе [8], доказывается, что наличие крупномасштабных турбулентных пульсаций и вторичных циркуляционных потоков приводит не только к снижению скорости разделения, но и к перемешиванию зерен обогащаемого материала. Эти явления в наибольшей степени проявляются при разделении мелкого угля и шлама и являются одной из основных причин засорения продуктов обогащения посторонними фракциями. Авторы утверждали, что конструкции высокоэффективных обогатительных машин для гравитационного обогащения должны исключать возможность крупномасштабных турбулентных пульсаций и вторичных циркуляционных потоков. В результате оптимизации концентрационных столов с гидродинамической точки зрения предложен способ периодической пульсирующей подачи смывной воды и новый вид нарифления типа «Обратная волна».

Кроме того в работе [7] упоминается концентрационный стол, в котором за счет подачи дополнительной пульсирующей воды в вертикальном направлении через пористую деку достигнуто трехкратное повышение удельной производительности.

Однако по ряду причин, требующих уточнения, эти направления совершенствования концентрационных столов не получили распространения.

Постановка задачі.

Целью данного исследования является изучение гидродинамических процессов в межрифельном пространстве концентрационного стола для оптимизации параметров дек, что позволит существенно (в 2...3 раза) увеличить удельную производительность этих машин.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- разработать математическую модель движения жидкости в межрифельном пространстве деки концентрационного стола;
- разработать и изготовить экспериментальную установку, физически моделирующую элемент деки стола для определения степени соответствия теоретических результатов экспериментальным;
- выполнить компьютерное моделирование гидродинамических процессов концентрационного стола для оптимизации конструктивных, динамических и гидравлических параметров стола;
- разработать конструкцию промышленного концентрационного стола с увеличенной удельной производительностью, испытать и внедрить в производстве.

Настоящая статья посвящена решению первой задачи.

Изложение материала и результаты.

Рассмотрим движение потока жидкости над рифлями и течение в желобках между рифлями наклонной деки концентрационного стола (рис. 1). Уровень воды над нарифлениями h определить методами численного моделирования – нетривиальная задача, требующая как минимум сложной математической модели, определяющей свободную поверхность, а для получения полной картины потоков не достаточно будет рассматривать одиночный участок между двумя произвольными рифлями. Дополнительный ввод жидкости также приводит к неповторяющемуся распределению потоков по длине деки. Рационально в данном случае использовать данные эксперимента, что существенным образом упрощает задачу.

Построим модель течения жидкости с учетом следующих предположений:

- будем считать поперечный размер стола достаточно большим, что позволит ограничиться рассмотрением течения в плоскости на удалении от краев стола;
- угол наклона деки достаточно мал, чтобы исключить из рассмотрения кривизну поверхности уровня воды (участок 2-3);

- отсутствует поперечное возвратно-поступательное движение;
- режим течения установившийся.

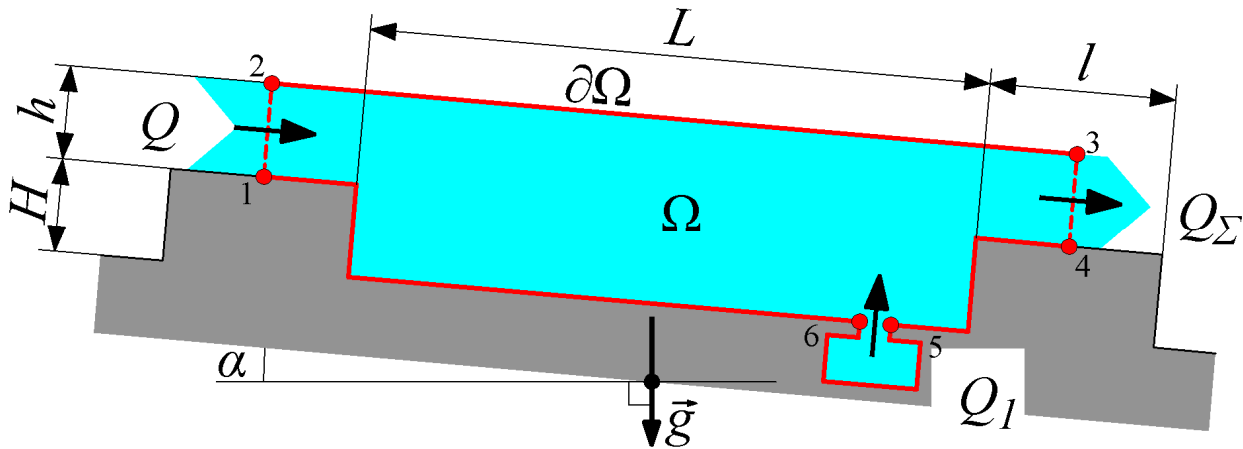


Рис. 1 – Расчетная схема

Скорость поступающего потока выберем таким образом, чтобы соблюсти известный расход жидкости через поперечное сечение деки. Для расчета скорости из расхода берем эффективное сечение с учетом поперечного размера деки длиной 1 м.

Режим течения в каверне между нарифлениями можно оценить из числа Рейнольдса

$$Re = \frac{u \cdot 2h \cdot \rho}{\eta},$$

где u – характерная скорость течения, м/с;

ρ – плотность воды, 998,2 кг/м³;

η – коэффициент динамической вязкости воды, $1,01 \times 10^{-3}$ Па·с (при 20°C).

Для геометрии и скоростей потока, соответствующих действующим концентрационным столам для обогащения угольных шламов, число Re находится в диапазоне 275...1100, что соответствует переходным режимам течения. В этом диапазоне невозможно получить численного решения уравнения Навье-Стокса для стационарного режима, а методами установления (решая задачу во времени) возможно получить результаты с использованием специальных приемов стабилизации.

Для математического описания вынужденной конвекции в полости каверны (рис. 1, область Ω) используем систему уравнений гидродинамики для случая течения несжимаемой ньютоновской жидкости [9]:

Уравнение Навье-Стокса

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \rho \vec{g} - \nabla P + \eta \nabla \cdot [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \quad (1)$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²;

\vec{u} – вектор скорости течения, м/с;

P – давление, Па.

Уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (2)$$

Уравнения (1)-(2) дополняются краевыми условиями [10, 11].

Начальным состоянием для решения стационарной задачи, а также распределением в начальный момент времени t_0 при решении задачи методом установления (когда невозможно получить решение для стационарной задачи) предполагается отсутствие потоков, либо информация о распределении скорости, полученная из решения для более низких чисел Re:

$$\vec{u}_\Omega = 0; \quad P_{\partial\Omega_{2-3}} = P_0 \equiv 0.$$

Из физических соображений на внутренних границах стенок $\partial\Omega$ для скорости действует условие прилипания и непроницаемости:

$$\vec{u}|_{\partial\Omega_{4-5,6-1}} = 0.$$

На свободной поверхности действует условия скольжения – нормальная компонента скорости равна 0. Значение давления на всех открытых поверхностях в силу незначительного перепада по высоте, в сравнении с величиной гидростатического давления, можно считать одинаковым и для удобства принять равным 0:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{3-4}} = 0; \quad \vec{\tau} \cdot \left(-P\vec{I} + \eta [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \right) \vec{n}|_{\partial\Omega_{3-4}} = 0; \quad P|_{\partial\Omega_{3-4}} = 0,$$

где \vec{n} – нормаль к границе,

$\vec{\tau}$ – единичный вектор касательной к границе.

Условия втекания и истечения выбираются согласно физической постановке задачи:

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{1-2}} &= u_{ex} \equiv \frac{Q}{s \cdot h}; \quad \vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{1-2}} = 0; \\ \vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{1-2}} &= u_{bix} \equiv \frac{Q + Q_1}{s \cdot h}; \quad \vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{3-4}} = 0; \\ \vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{5-6}} &= u_1 \equiv \frac{Q_1}{s \cdot h_1}; \quad \vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_{5-6}} = 0. \end{aligned}$$

Для высоких чисел Рейнольдса, когда имеет место турбулентный режим течения, применим широко распространенную для инженерных задач математическую k-ε модель турбулентного движения [12], базирующуюся на предположении Буссинеска.

Система (1)-(2) дополняется уравнениями для учета турбулентности, при этом уравнение (1) заменяется уравнением движения с осреднением по Рейнольдсу

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \eta(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \rho \vec{g} - \nabla P + \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \cdot \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right], \quad (3)$$

где \vec{u} – вектор скорости течения, м/с;

η_T – турбулентная вязкость, $\eta_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$.

Уравнение турбулентной кинетической энергии

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho \vec{u} \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \eta_T \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho \varepsilon \quad (4)$$

и скорости ее диссипации

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \rho \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_T \cdot \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

где k – ускорение свободного падения, м/с²;

ε – вектор скорости течения, м/с;

$C_\mu=0,09$, $C_{\varepsilon 1}=1,44$, $C_{\varepsilon 2}=1,92$, $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1,3$ – стандартные значения эмпирических постоянных k-ε модели [12].

Постановка начальных и граничных условий для системы уравнений (2)-(5) аналогична приведенной выше.

Следует различать гидростатическое и гидродинамическое давление. Наклон деки стола при данной постановке задачи, не учитывающей наличие тяжелых фракций частиц, не имеет влияния на гидродинамику потоков, т.к. определяет лишь расход жидкости, который задан напрямую. Поэтому в уравнениях (1) и (3) можно исключить и силу тяжести.

Гидростатическое давление будет важно, если на границу $\partial\Omega_{1-2}$ организовать перенос состояния с границы $\partial\Omega_{3-4}$. В таком случае расход жидкости будет определяться естественным путем.

Это можно организовать при условии соблюдения расходов на входе и на выходе. Дополнительные источники воды на участке от входного сечения до выходного делают это невозможным, в данном

случае можно только опираться на предварительные расчеты задачи с соблюдением расхода для определения скорости во входном сечении.

Результаты численного моделирования.

Тестовый расчет для данной геометрии и уровня h с заданием таких периодических граничных условий на входе и выходе, когда значения скоростей, давления, турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации с правой границы переносились на левую, а движение жидкости определялось исключительно вектором силы тяжести, показал $u_{вх.ср.} = u_{вых.ср.} = 0,4$ м/с, что соответствует $Q = 8,64$ м³/ч×м длины деки.

На рис. 2 приведена типичная структура течений, возникающих между нарифлениями. За обратным уступом возникает предсказуемая из законов гидродинамики зона обратной циркуляции. Скорости движения жидкости в основном потоке значительно превышают таковые в зоне циркуляции и всем пространстве между нарифлениями.

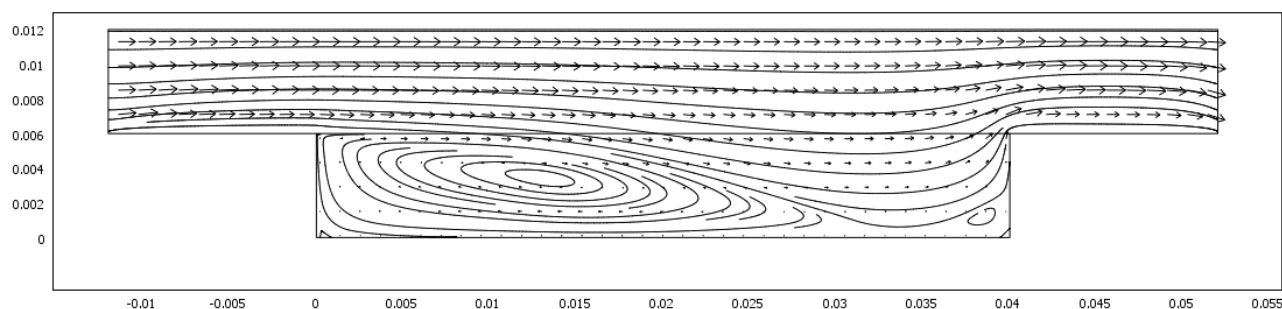


Рис. 2 – Структура течений при угле наклона деки $\alpha = 2^\circ$ и расходе $Q = 0,5$ м³/ч на 1 м длины деки

Данная постановка модельной задачи позволяет выявить качественные особенности течения при вводе дополнительных потоков жидкости.

Как следует из рис. 3, при помощи ввода дополнительных потоков можно в значительной мере интенсифицировать течения в застойных зонах (рис. 3а), а также практически полностью подавлять обратные циркуляционные течения (рис. 3б).

Интерес представляет также моделирование течения жидкости с не прямоугольной геометрией нарифления (рис. 4).

При помощи создания более плавной геометрии нарифления можно интенсифицировать течения во внутренней области, как показано на рис. 4а, а также в значительной мере подавлять обратные циркуляционные течения (рис. 4б).

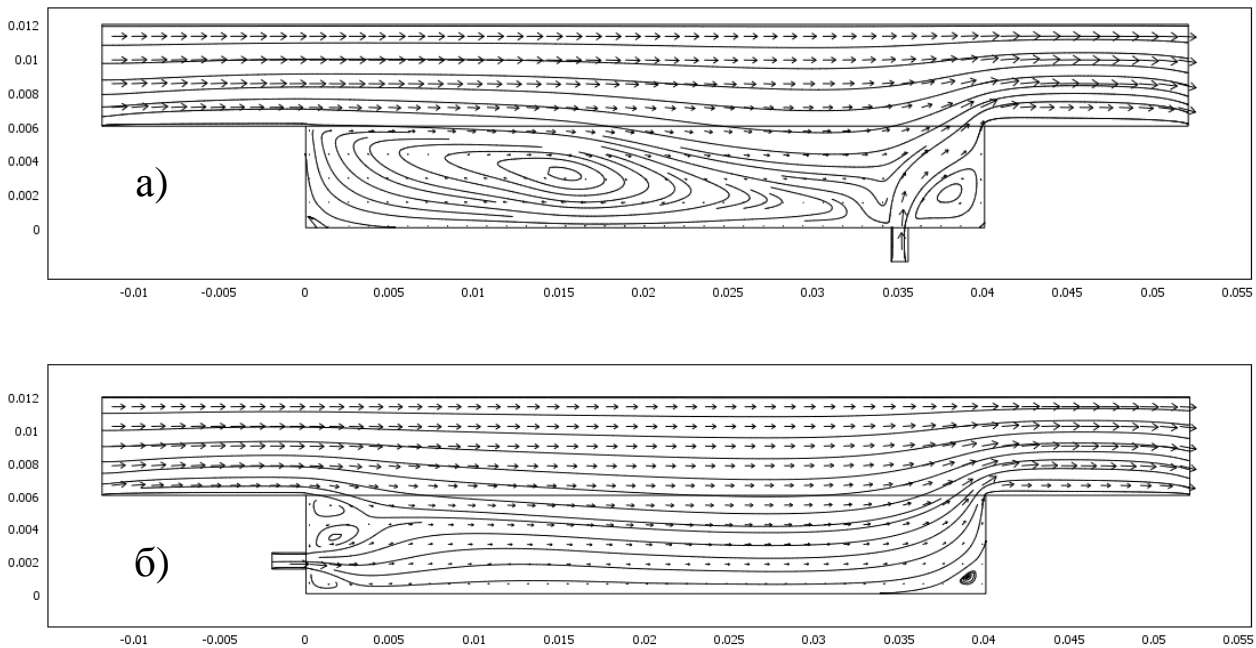


Рис. 3 – Структура течений при углі наклону деки $\alpha=5^\circ$, расходах основного потока $Q=1\text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 м ширины деки и различными положениями ввода дополнительной подпитки с расходом $Q_1=0,15Q$.

Численное моделирование течений позволяет достаточно быстро и эффективно проводить анализ и оптимизацию конструкции на-рифлений и различных приемов воздействия на потоки жидкости с целью повышения эффективности работы концентрационного стола. При этом нет необходимости изготавливать все многообразие моделей, а тем более полноразмерных дек, для натуральных физических экспериментов и проводить визуализацию течений с последующей обработкой. Достаточно выполнить на физической модели проверку адекватности результатов для наиболее удачных с точки зрения эффективности вариантов конфигурации рифлей либо дополнительного воздействия на поток жидкости.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Сформулирована математическая модель гидродинамических процессов движения жидкости в межрифельном пространстве деки концентрационного стола.

Предложенная модельная задача позволяет выявить качественные особенности течения при вводе дополнительной подпитки и различной геометрии рифлей.

Численное моделирование течений позволяет быстро и эффективно (со значительной экономией материалов и времени на изготов-

ление натуральных моделей) проводить анализ и оптимизацию конструкции дек концентрационного стола.

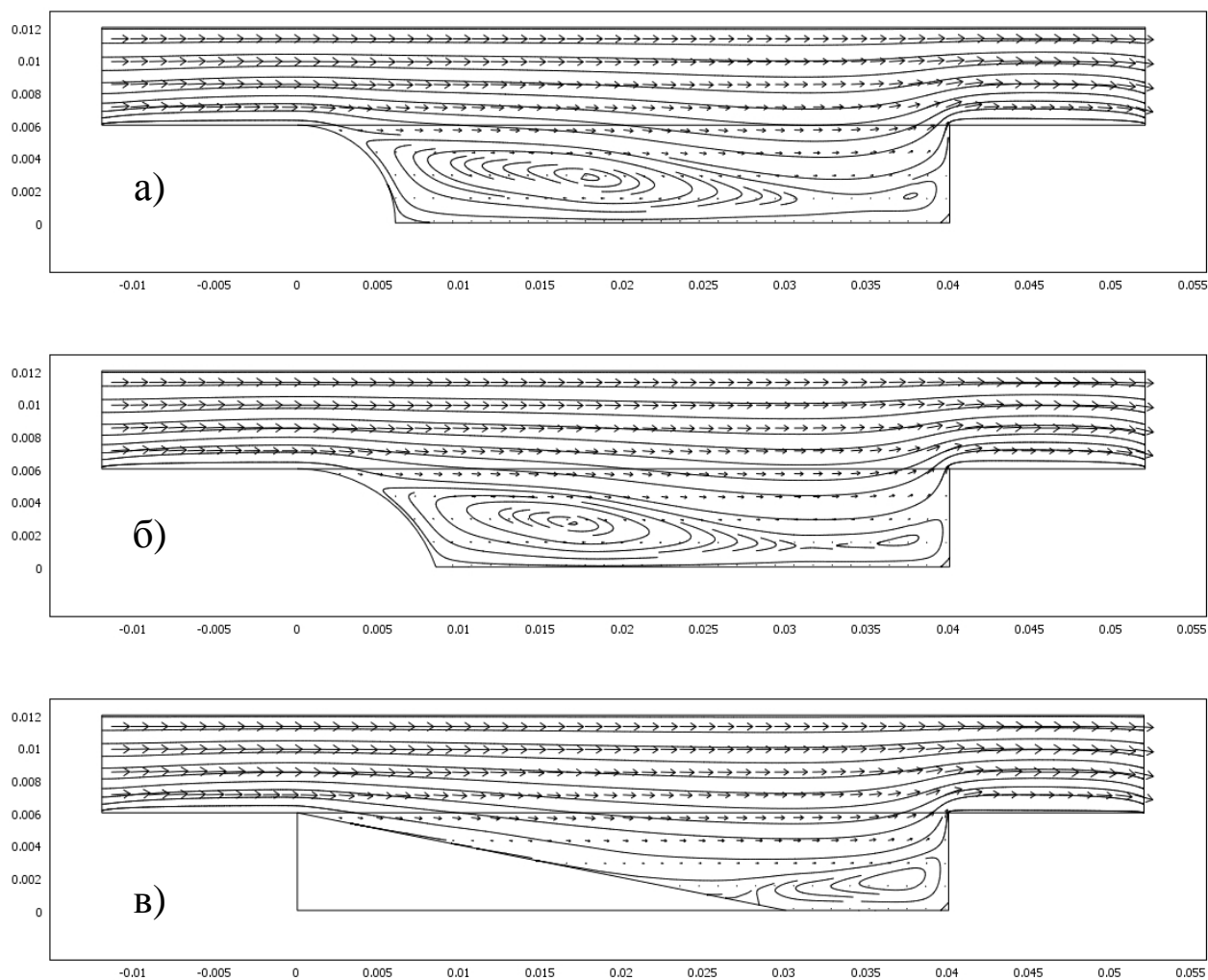


Рис. 4 – Структура течений при угле наклона деки $\alpha=5^\circ$ и альтернативной конфигурации обратного уступа:
а – $Q=1 \text{ м}^3/\text{ч}$, $R=H$; б – $Q=1 \text{ м}^3/\text{ч}$, $R=1,5H$; в – $Q=1 \text{ м}^3/\text{ч}$;

С помощью оптимизации геометрии и ввода дополнительной подпитки можно в значительной мере изменять характер движения жидкости в межрифельном пространстве.

Учет поперечного поступательного движения может существенным образом сказаться на турбулизации течения (в зависимости от амплитуды и частоты колебаний). Для учета поперечного движения необходимо вести расчет в трех проекциях на протяженном участке деки, пропорциональном амплитуде поперечных колебаний.

В дальнейшем, с целью уточнения математической модели и полученных зависимостей, планируется проведение экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях.

Список літератури

1. Испытания концентрационного стола СКО-5х2 в полевых условиях / [Е.И. Назимко, С.Л. Букин, А.Н. Корчевский, и др.] // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 40 (81). – С. 91-96.
2. Букин С.Л. Комплекс обогащения угольных шламов на основе концентрационного стола / С.Л. Букин, А.Н. Корчевский, Р.А. Шолда // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 43 (84). – С. 54-61.
3. Интенсификация технологических процессов вибромашин путем реализации бигармонических режимов работы / [С.Л. Букин, С.Г. Маслов, А.П. Лютый, Г.Л. Резниченко] // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77) - 37(78). – С. 81-89.
4. Шохин В.Н. Гравитационные методы обогащения. Учебник для вузов / В.Н. Шохин, А.Г. Лопатин. – М.: Недра, 1980. – 400 с.
5. Исаев И.Н. Концентрационные столы. Монография / И.Н. Исаев. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 100 с.
6. Благов И.С. Обогащение углей на концентрационных столах: монография / И.С. Благов. – М.: Недра, 1967. – 136 с.
7. Берг Р.О. Технология гравитационного обогащения / Р.О. Берг при участии К. Миллза; Пер. с англ. – М.: Недра, 1990. – 574 с.
8. Интенсификация процесса обогащения углей мелких классов / [Н.Н. Виноградов, К.К. Коллодий, Г.М. Гурвич, В.В. Беловолов]; под ред. И.С. Благова // В кн.: Обогащение углей в СССР. – М.: Недра, 1973. – С. 34-45.
9. Panton R.L. Incompressible Flow: second edition / R.L. Panton // John Wiley & Sons, Inc., 1996. – 434 p.
10. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
11. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2 т. / Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 782 с.
12. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD / D.C. Wilcox // DCW Industries Inc., 1998. – 387 p.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2013

С. Л.Букин*, **В. Ф.Комаров****, **Р. О. Шолда***. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (*), Донецький національний університет (**)

Математична модель руху рідини в міжрифельному просторі деки концентраційного столу

Розроблена математична модель руху рідини у міжрифельному просторі деки концентраційного столу. За допомогою отриманої моделі проведено чисельне моделювання течій у міжрифельному просторі для різної геометрії нарифлення та випадку вводу додаткового підживлення.

Ключові слова: математична модель, гідродинаміка, течія, рідина, міжрифельний простір, дека, концентраційний стіл.

S.Bykin*, **V.Komarov****, **R.Sholda***. Donets National Technical University (*), Donets National University (**)

A Mathematical Model of the Liquid Flow in the Space Between the Riffles of a Table Concentrator Deck

This paper provides a mathematical model of the liquid flow in the space between the riffle lines of a table concentrator deck. With the help of this model the numerical simulation of the flows was done for different riffle geometry.

Keywords: mathematical model, hydrodynamics, flow, liquid, space between riffles, deck, table concentrator.