

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРОВ ПРИСТЕННЫМ ПОТОКОМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В работе [1] рассмотрены особенности расчета методом контрольных объемов гидродинамических параметров противоточного гидроциклона с пристенной перечисткой зернистых материалов в его конической части. При исследовании турбулентного потока суспензии в этом гидроциклоне выделено два вида течений: двухмерное турбулентное в межпластинчатом канале и трехмерное вихревое в цилиндрической части гидроциклона. Учитывая различный характер обтекания потоком вязкой жидкости пластин и цилиндрических поверхностей, научной и практической задачей по обоснованию и выбору конструктивных элементов перечистки зернистых материалов является исследование обтекания цилиндров, расположенных на рабочей поверхности (стенке) сепарационного устройства.

Анализ исследований и публикаций. Результаты экспериментальных исследований [2] показывают, что механизм течения вязкой жидкости за цилиндрическим телом, расположенным на твердой поверхности, значительно отличается от такового при обтекании цилиндра неограниченным потоком. Для определения этих отличительных особенностей Шлихтинг [2, 3] выполнил ряд опытов, в которых измерялось поле результирующей скорости вязкой жидкости при обтекании шаров диаметром 4 мм, расположенных на гладкой горизонтальной плоскости (рис. 1)

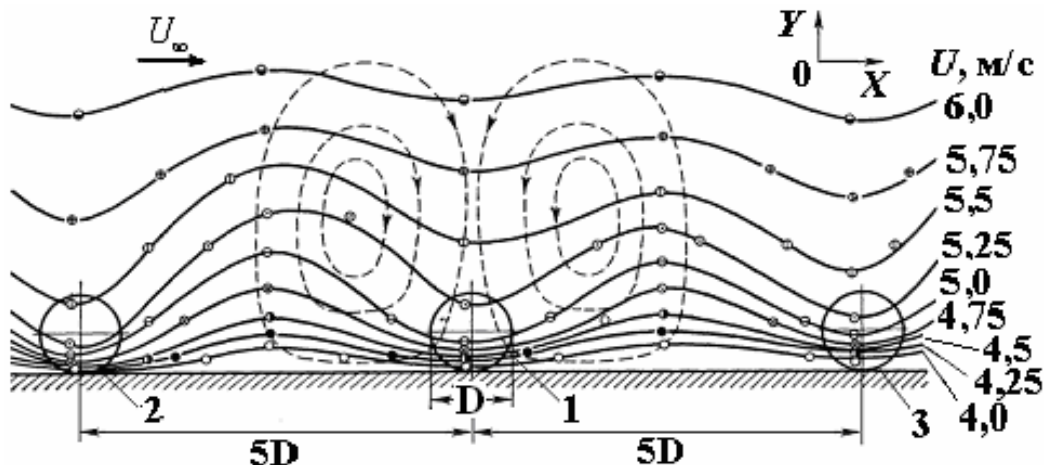


Рис. 1. Распределение результирующей скорости вязкой жидкости при обтекании шаров на плоской стенке (сплошная кривая) и вторичные течения в пограничном слое (штриховая линия): 1, 2, 3 – шары; D – диаметр шара, м; U – результирующая скорость вязкой жидкости, м/с; U_∞ – скорость набегающего потока, м/с [2, 3]

Гравітаційна сепарація

Как видно из рис. 1 вблизи стенки наблюдается явление обратного эффекта спутного течения, что является следствием вторичных течений вязкой жидкости в межшаровом пространстве [2].

Так как ламинарный режим обтекания цилиндра наблюдается и в случае, когда набегающий поток имеет турбулентные свойства [2], то схему, изображенную на рис. 1, можно использовать для исследования особенностей обтекания цилиндров пристенным потоком вязкой жидкости.

Постановка задачи. Целью данной работы является анализ особенностей обтекания потоком вязкой жидкости цилиндров, расположенных на стенке.

Изложение материала и результаты. При обтекании пристенным потоком вязкой жидкости криволинейной поверхности возникает центробежная сила, которая искажает линии тока и является причиной возникновения неустойчивости потока [4]. Последняя наиболее четко выражена в пограничном слое, сформировавшемся на криволинейной поверхности. При этом возникает дисбаланс между центробежной силой и градиентом давления, что в свою очередь приводит к формированию вихрей на поверхности стенки [5]. Примером проявления указанного дисбаланса является образование вихрей на поверхности криволинейного канала [4], а также за точкой отрыва пограничного слоя на поверхности цилиндра.

На рис. 2 представлена схема течения вязкой жидкости в ламинарном пограничном слое на поверхности криволинейной стенки [4].

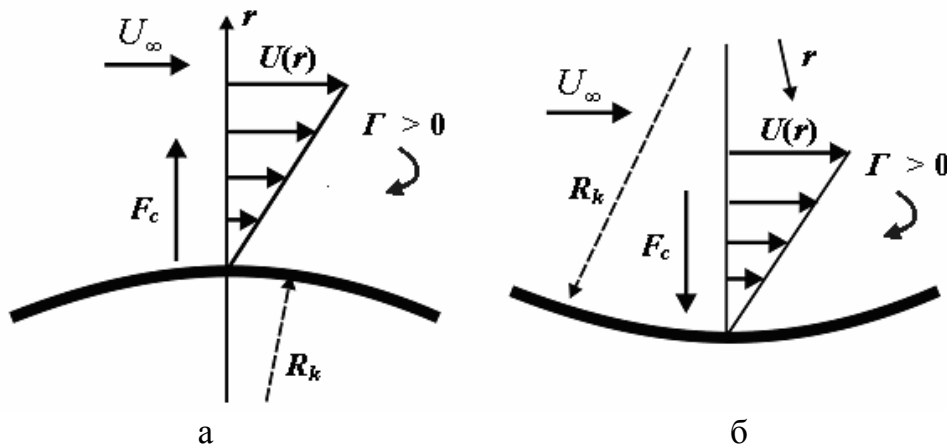


Рис. 2. Схемы течения вязкой жидкости в ламинарном пограничном слое на выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхности: $\Gamma = rU(r)$ – циркуляция скорости в вихре, $\text{м}^2/\text{с}$; r – расстояние между центром кривизны поверхности и произвольной точкой потока, м; $U(r)$ – распределение скорости вязкой жидкости в ламинарном пограничном слое, м/с; R_k – радиус кривизны поверхности, м; U_∞ – скорость набегающего потока, м/с; F_c – центробежная сила, Н

Поскольку неустойчивость течения вязкой жидкости в ламинарном и турбулентном пограничных слоях имеет общие закономерности [4], то представленную на рис. 2 схему можно использовать для исследования особенностей турбулентных течений вблизи криволинейной стенки.

Согласно критерию Релея [4], необходимым и достаточным условием существования неустойчивости невязкого циркуляционного потока будет следующее:

$$\frac{d(\Gamma^2)}{dr} < 0, \quad (1)$$

где $\Gamma = rU(r)$ – циркуляция скорости в вихре, $\text{м}^2/\text{с}$; r – расстояние между центром кривизны поверхности и произвольной точкой потока, м.

Если в невязком циркуляционном пристенном потоке жидкости вблизи криволинейной поверхности (рис. 2) величина $|\Gamma|$ уменьшается с увеличением расстояния r , то поток является неустойчивым, а если наоборот, то поток устойчивый [4]. Учитывая, что для потока реальной жидкости характерно присутствие сил вязкостного трения между соседними слоями жидкости, критерий (1) можно использовать для приближенной оценки характера вязкого циркуляционного течения.

Из рис. 2, а следует, что по мере увеличения расстояния r величина $U(r)$, а, следовательно, и величина $|\Gamma|$ возрастают. Поэтому течение в ламинарном пограничном слое является устойчивым. Обратная картина наблюдается на рис. 2, б, где с увеличением расстояния r величина $|\Gamma|$ уменьшается, и, следовательно, течение в ламинарном пограничном слое соответственно будет неустойчивым.

На рис. 3 приведены схемы ламинарного обтекания пристенным потоком вязкой жидкости трех tandemных цилиндров, расположенных на неподвижной стенке.

Анализ схем (рис. 3) обтекания цилиндров пристенным потоком вязкой жидкости показывает, что устойчивый характер течения наблюдается вблизи горизонтальной (рис. 3,а) и выпуклой (рис. 3,г) поверхностей стенки, что соответствует схемам, изображенным на рис. 1 и рис. 2, а.

Неустойчивый характер течения наблюдается вблизи поверхности стенки (рис. 3, б-в), что соответствует схеме на рис. 2, б.

На базе уравнений движения двухфазной среды [6] и методики расчета его гидродинамических параметров [1] путем численного моделирования рассмотрим особенности обтекания пристенным потоком вязкой жидкости цилиндров на примере схем, изображенных на рис. 3.

Результаты расчета гидродинамических параметров обтекания цилиндров по схеме, изображенной на рис. 3, а

Гравітаційна сепарація

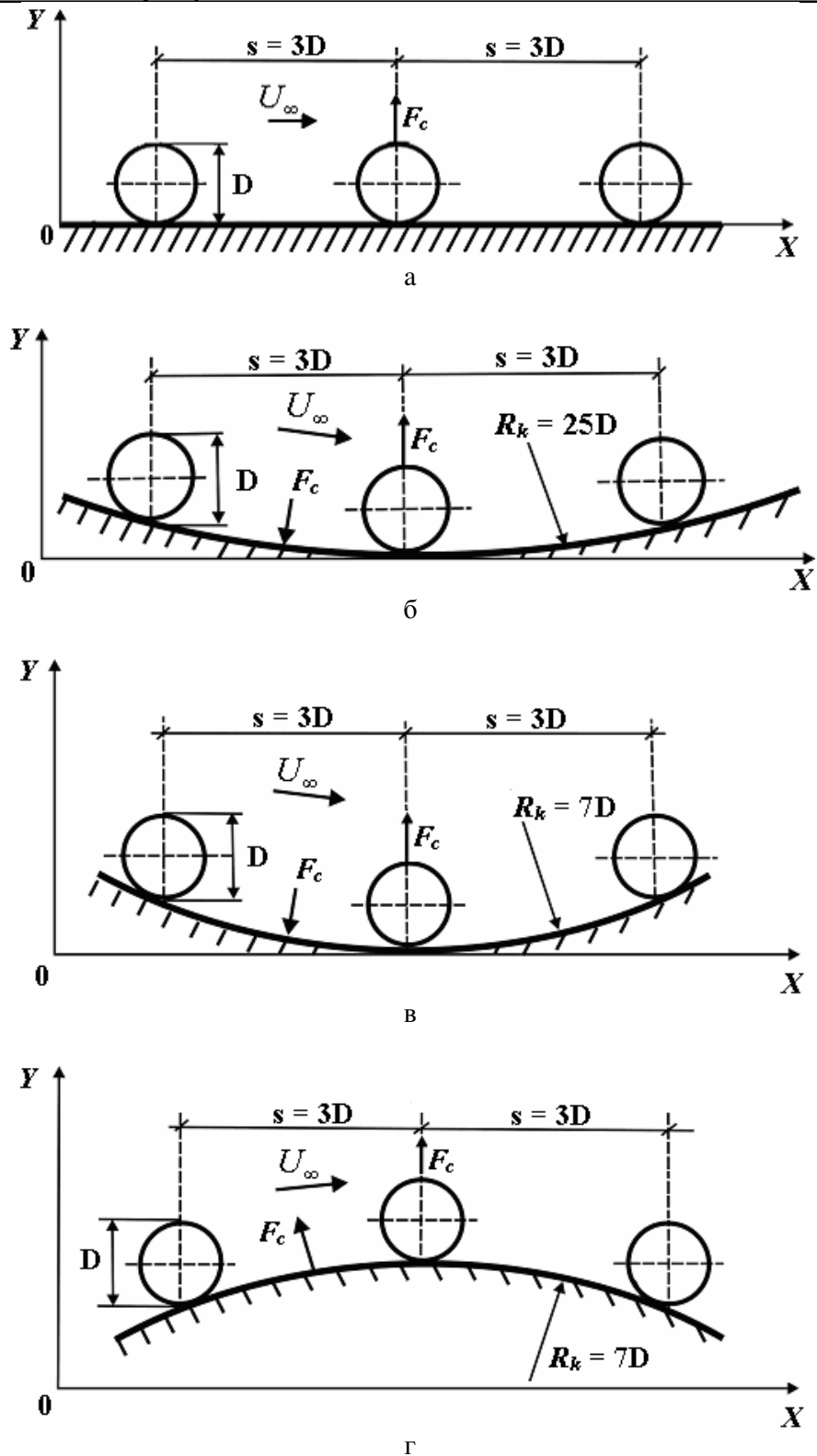


Рис. 3. Схеми обтекания потоком вязкой жидкости трех тандемных цилиндров, расположенных на горизонтальной (а), вогнутой (б, в) и выпуклой (г) стенках: R_k – радиус кривизны поверхности, м; U_∞ – скорость набегающего потока, м/с; F_c – центробежная сила, Н; D – диаметр цилиндра, м

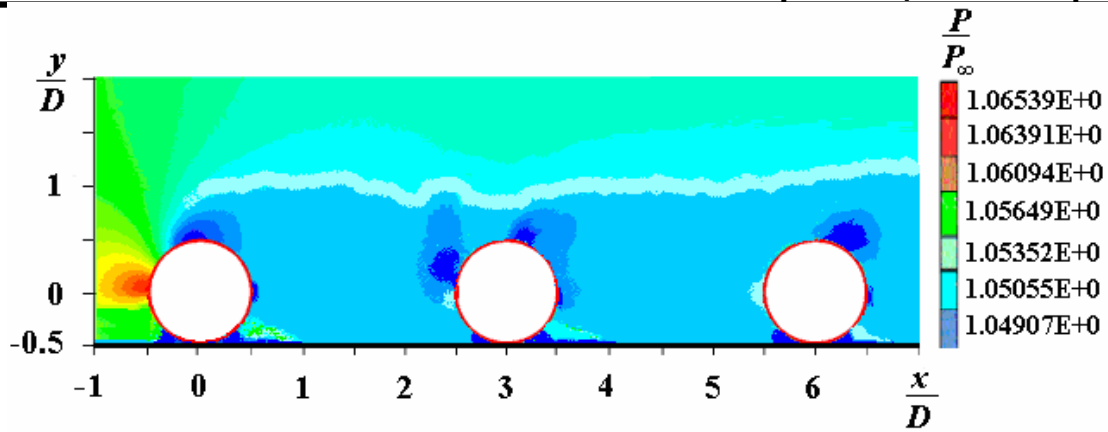


Рис. 4. Распределение давления вязкой жидкости, отнесенного к среднему давлению набегающего потока

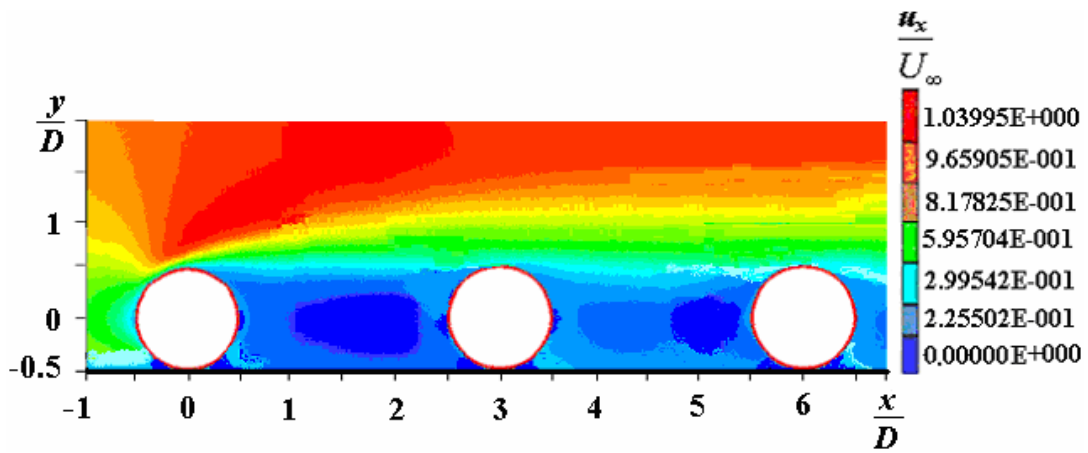


Рис. 5. Распределение продольной составляющей скорости вязкой жидкости, отнесенной к средней скорости набегающего потока

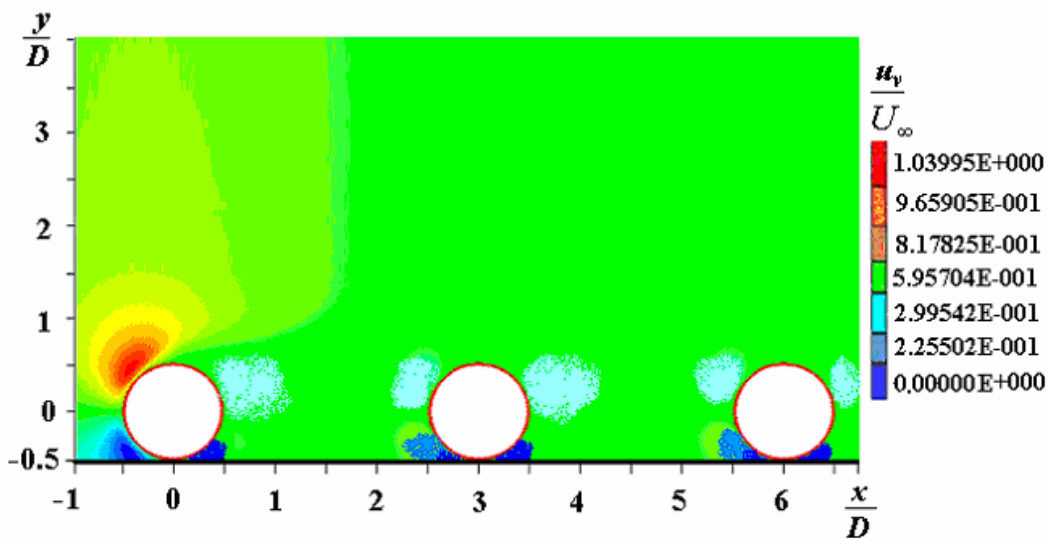


Рис. 6. Распределение поперечной составляющей скорости вязкой жидкости, отнесенной к средней скорости набегающего потока

Гравітаційна сепарація

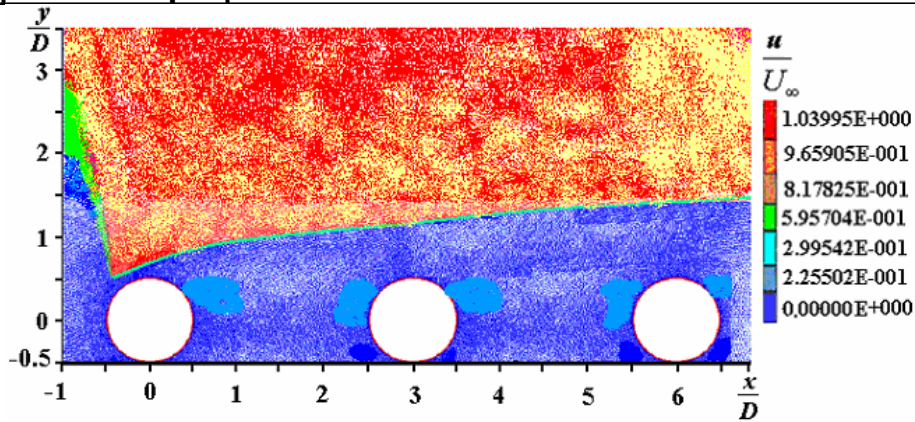


Рис. 7. Распределение результирующей скорости вязкой жидкости, отнесенной к средней скорости набегающего потока

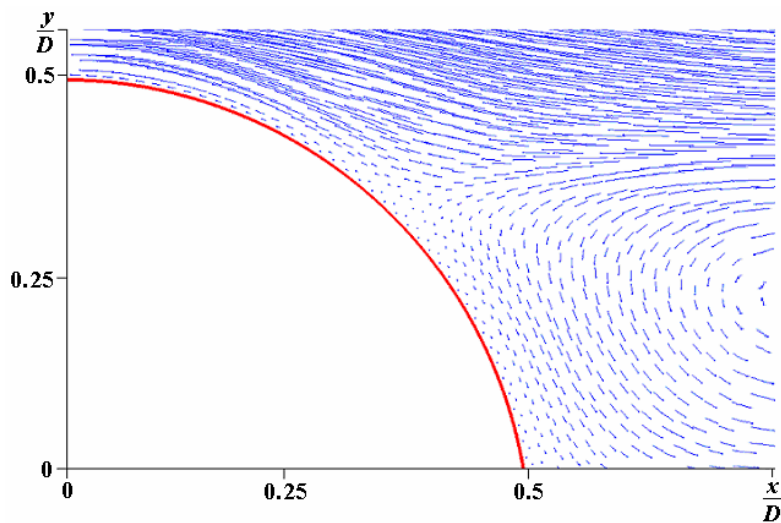


Рис. 8. Поле вектора результирующей скорости вязкой жидкости вблизи точки отрыва на цилиндре 1

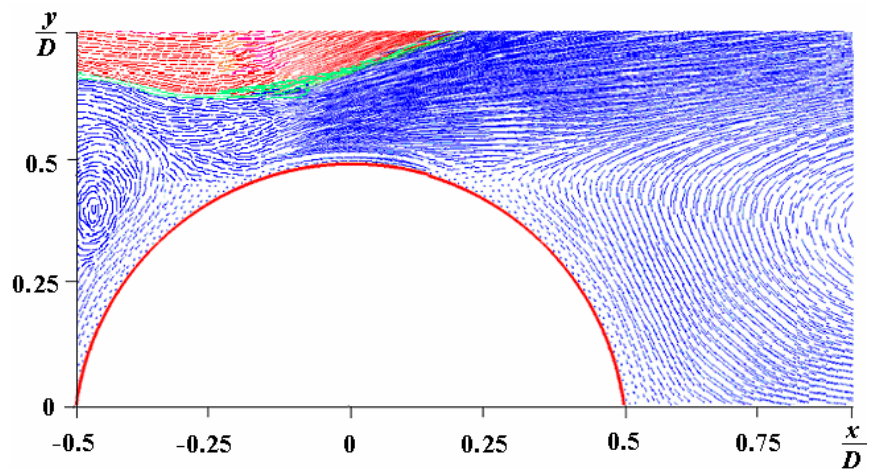


Рис. 9. Поле вектора результирующей скорости вязкой жидкости вблизи точки отрыва и присоединения на цилиндре 2

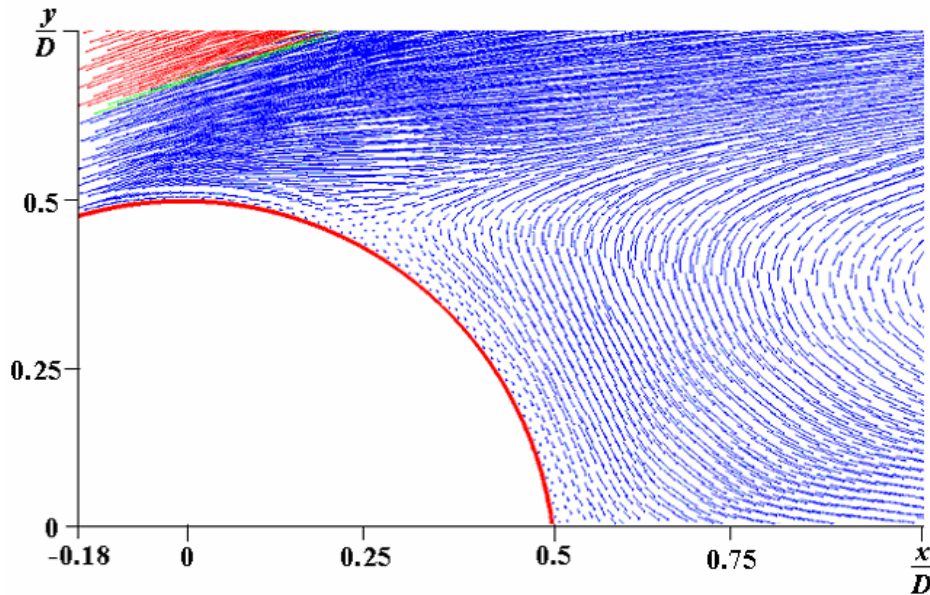


Рис. 10. Поле вектора результирующей скорости вязкой жидкости вблизи точки отрыва на цилиндре 3

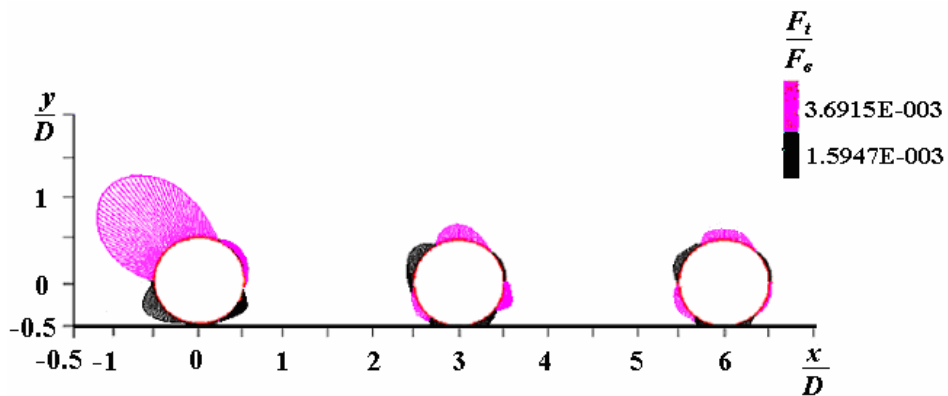


Рис. 11. Общий вид эпюры силы трения вязкой жидкости на поверхности цилиндров, отнесенной к средней величине силы трения на цилиндрической поверхности с единичной площадью ($F_s = \tau_0 S_0 \cos\theta$, где τ_0 – касательное напряжение на поверхности цилиндра [2], Па; $S_0 = 1$ – единичная площадь; θ – угол между касательной к поверхности цилиндра и направлением средней скорости набегающего потока, град)

Проанализируем результаты (рис. 4-11) численного моделирования обтекания цилиндров пристенным потоком вязкой жидкости.

Анализ результатов численного моделирования обтекания цилиндров по схеме, изображенной на рис. 3, а

Из рис. 4 видно, что вблизи стенки за цилиндрами возникает область повышенного давления, а перед цилиндром 2 существует область пониженного давления. Перед передней критической точкой на цилиндре 1 давление вязкой жидкости достигает своего максимума. В связи со снижением скорости вязкой жидкости в спутном следе за цилиндрами и вблизи задней критической точки, давление вязкой жидкости достигает своего минимального значения.

Гравітаційна сепарація

Продольная составляющая скорости вязкой жидкости (рис. 5) в спутном следе за цилиндрами уменьшается, а перед цилиндром 2 возникает вихревая область. Кроме того, вблизи стенки за цилиндрами наблюдается ускоренное течение, что не противоречит экспериментальным исследованиям [2, 3]. За пределами спутного следа продольная составляющая скорости вязкой жидкости увеличивается.

Поперечная составляющая скорости вязкой жидкости, как видно из рис. 6, достигает своего наибольшего значения выше передней критической точки на цилиндре 1, а также увеличивается вблизи стенки за цилиндрами, где происходит локальное ускорение потока. Увеличение поперечной составляющей скорости наблюдается и в вихревой области перед цилиндром 2.

Падение результирующей скорости вязкой жидкости (см. рис. 7) происходит не только в спутном следе за цилиндрами, а уже перед цилиндром 1. Это связано с торможением потока и предположительно с возникновением его асимметрии.

Начиная с цилиндра 1 (см. рис. 8-10) наблюдается постепенное смещение точки отрыва ламинарного пограничного слоя в сторону точки минимума давления. Это связано с асимметрией потока в спутном следе, а также с влиянием вихрей на структуру течения. В частности, из рис. 9 следует, что перед цилиндром 2 возникает вихревая область, за которой происходит ускорение течения вязкой жидкости и его отрыв с образованием вихря.

Снижение силы трения вязкой жидкости на поверхности цилиндров 2 и 3 (рис. 11) связано с падением скорости в спутном следе за цилиндром 1.

Наибольшие значения силы трения сосредоточены между передней критической точкой и точкой минимума давления на цилиндре 1. Это связано с большей, чем в спутном следе скоростью течения вязкой жидкости. Между передней критической точкой на цилиндре 2 и точкой присоединения потока происходит постепенное увеличение силы трения, а затем ее снижение. Между точками присоединения и отрыва потока наблюдается аналогичная картина.

Подобное численное моделирование было выполнено и для схем обтекания пристенным потоком вязкой жидкости цилиндров, изображенных на рис. 3, б-г.

Анализ результатов численного моделирования обтекания цилиндров по схемам, изображенным на рис. 3, б-в.

При схеме обтекания цилиндра, изображенной на рис 3,б, возникает неустойчивость потока, которая проявляется в увеличении вихревой области перед цилиндром 2. Характер распределения давления, продольной и поперечной составляющих скорости вязкой жидкости, а также поля вектора результирующей скорости приблизительно такой же, как и по схеме обтекания, приведенной на рис. 3, а. Отличие только в незначительном увеличении ширины спутного следа и размеров вихрей за цилиндрами.

По сравнению с обтеканием цилиндров, расположенных на горизонтальной стенке (рис. 11), по схеме на рис 3, б наблюдается снижение величины силы трения на поверхности каждого цилиндра.

Гравітаційна сепарація

Для схемы обтекания цилиндров, изображенной на рис. 3,в, характерна еще большая неустойчивость потока, что связано с увеличением кривизны стенки. Здесь наблюдается более заметное увеличение ширины спутного следа, вихревой области перед цилиндром 2, а также вихрей за цилиндрами. Характер распределения давления, продольной и поперечной составляющих скорости вязкой жидкости, а также результирующей скорости будет аналогичен схеме обтекания цилиндров, изображенной на рис. 3,б. Отличие только в уменьшении давления, продольной составляющей скорости, а также в незначительном увеличении поперечной составляющей скорости вязкой жидкости. Это связано с увеличением кривизны стенки и, как следствие, со снижением скорости набегающего потока.

Характер распределения силы трения по поверхности каждого из цилиндров на вогнутой поверхности (рис. 3, б) аналогичен ее распределению по схеме, изображенной на рис. 3, в. Отличие состоит в незначительном увеличении силы трения выше передней критической точки на цилиндре 1 и на цилиндре 2, что можно объяснить усилением асимметрии потока в спутном следе.

Анализ результатов численного моделирования обтекания цилиндров по схемам, изображенным на рис. 3, г.

Для схемы обтекания цилиндров, изображенной на рис. 3, г, характерна устойчивость течения вязкой жидкости вблизи стенки. По сравнению с другими схемами здесь наблюдается заметное увеличение ширины спутного следа за цилиндром 1, что связано с влиянием центробежной силы, оттесняющей поток вязкой жидкости от стенки.

Область повышенного давления сосредоточена вблизи цилиндра 1. Вихревая область перед цилиндром 2 заметно уменьшается, а за ним, наоборот, увеличивается. Это связано с влиянием рассмотренного ранее центробежного эффекта.

Увеличение ширины спутного следа приводит к падению продольной составляющей скорости вязкой жидкости.

По сравнению со схемой обтекания, изображенной на рис 3,в, вблизи передней критической точки на цилиндре 1 наблюдается незначительное уменьшение поперечной составляющей скорости вязкой жидкости.

Уменьшение величины результирующей скорости вязкой жидкости происходит по всей ширине спутного следа, а ее увеличение – за пределами спутного следа, а также на внешних границах вихрей.

К тому же на цилиндре 2 наблюдается смещение точки отрыва ламинарного пограничного слоя в сторону точки минимума давления, а на цилиндре 3 точка отрыва смещается в сторону задней критической точки.

Причем наибольшие значения силы трения сосредоточены в верхней части цилиндра 1. Далее по мере формирования спутного следа величина силы трения на цилиндрах 2 и 3 уменьшается.

Выводы и направления дальнейших исследований:

- асимметрия невозмущенного потока вязкой жидкости возникает вблизи

Гравітаційна сепарація

передней критической точки на поверхности цилиндра и изменяется в спутном следе в зависимости от радиуса кривизны стенки;

- для всех схем обтекания цилиндров потоком вязкой жидкости характерно уменьшение скорости течения вблизи стенки;
- результаты численного моделирования согласуются с данными экспериментальных исследований [2, 3];

В дальнейших исследованиях приведенные результаты планируется использовать для обоснования технического решения по перемешке пристенного слоя суспензии в сепарационных устройствах.

Список литературы

1. **Кривошеков В.И.** К расчету гидродинамических параметров противоточного гидроциклона с перемешкой на базе турбулентно-диффузионной модели [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 43(84). – С. 61-80.
2. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
3. **Schlichting H.** Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem. Ing. – Arch. 7, 1 – 34 (1936); NASA TM 823 (1937).
4. Вихори Гьортлера над увігнутою поверхнею вхідної частини вихрової камери [Текст] / **В.В. Бабенко, А.В. Воскобійник, В.А. Воскобійник, В.М. Турик** // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – 9, № 2-3. – С. 25-36.
5. **Swearingen J.D.** The growth and breakdown of streamwise vortices in the presence of a wall [Text] / J.D. Swearingen, R.F. Blackwelder // J. Fluid Mech. – 1987. – 182. – P. 255-290.
6. **Кривошеков В.И.** Кинетический подход к выводу уравнений движения двухфазной среды в сепарационных аппаратах [Текст] / В.И. Кривошеков // Обогащение руд. – 2001. – №6. – С. 23-26.

© Кривошеков В.И., 2011

*Надійшла до редколегії 04.04.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюсом*