

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СРЕД

М.Э. Эглит¹, А.Е. Якубенко², Т.А. Якубенко²

¹Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

² Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Потоки неньютоновских жидкостей, то есть сред, напряжения в которых являются нелинейными функциями компонент тензора скоростей деформаций и, возможно, других параметров, широко встречаются в природе и в технике. Таковы потоки, несущие взвешенные твердые частицы, которые используются в горнодобывающей, химической, пищевой, бумажной промышленности, при бурении нефтяных скважин, при производстве полимеров, в очистных сооружениях. Катастрофические потоки, возникающие на горных склонах, такие как снежные лавины, сели, оползни, лавовые потоки также проявляют неньютоновские свойства, в частности, могут останавливаться на склонах с ненулевым уклоном. Влияние сложной реологии на динамику ламинарных склоновых потоков неньютоновских сред рассматривалось, например, в [1-5]. Однако большинство потоков, встречающихся в природе и в технике, являются турбулентными.

Основная часть работ по турбулентным потокам неньютоновских жидкостей относится только к стационарным движениям по трубам и желобам и содержит только полуэмпирические формулы для коэффициентов сопротивления, профилей скорости и критериев перехода течения в турбулентный режим, выведенные на базе обработки экспериментальных данных. Существует лишь несколько работ, где используются полные математические модели для расчета турбулентных потоков неньютоновских жидкостей [6,7]. В этих работах также рассматриваются только стационарные течения в трубах и каналах фиксированных размеров, без учета возможности вовлечения массы со дна канала.

В данной работе впервые предлагается модель для расчета нестационарных турбулентных склоновых потоков, то есть открытых потоков, движущихся по склонам под действием силы тяжести, с учетом неньютоновских свойств среды и вовлечения потоком материала дна. Используется подход, основанный на описании осредненных по Рейнольдсу величин. Предполагается, что захват массы со дна происходит, если касательное напряжение на дне достигает значения предела прочности донного материала. Для описания турбулентных характеристик используется трехпараметрическая модель турбулентности, предложенная в [8] и в дальнейшем примененная для расчета движения жидкостей вдоль проницаемых и непроницаемых стенок в присутствии градиента давления, массо- и теплообмена и других процессов. Модель была обобщена с тем, чтобы описать нестационарные потоки со свободной поверхностью с учетом специального механизма вовлечения донного материала и неньютоновских свойств движущейся среды. Составлена программа и проведены серии расчетов, показывающие влияние реологических свойств и вовлечения массы на поведение потока [9,10]. Обнаружено, в частности, что в потоках бингамовских и дилатантных степенных жидкостей, захватывающих материал дна, турбулентные характеристики могут иметь в поперечном сечении не один, а два локальных максимума – один вблизи дна и второй в центральной части сечения потока.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 15-01-00361, 15-01-08023).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Bovet, E., Chiaia, B., and Preziosi, L. 2010. A new model for snow avalanche dynamics based on non-Newtonian fluids. *Meccanica*, 45(6), 753-765
2. Issler D, M. Pastor Pérez. Interplay of entrainment and rheology in snow avalanches; a numerical study. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(58), 143-147.
3. М.Е. Эглит and А.Е. Якубенко. Numerical modeling of slope flows entraining bottom material. *Cold Regions Science and Technology*. 2014. 108, 139–148.
4. М.Э. Эглит, А.Е. Якубенко, Т.А. Якубенко. Численное моделирование нестационарного потока нелинейно-вязкой жидкости. Модели и методы аэродинамики. Материалы Тринадцатой Международной школы-семинара. М.:МЦНМО. 2013. С. 218-219.
5. Зайко Ю.С. Численное моделирование склоновых потоков различной реологической природы. *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*. 2016. №4.
6. M. Rudman, H.M. Blackburn. Direct numerical simulation of turbulent non-Newtonian flow using a spectral element method. // *Applied Mathematical Modeling*. 2006. V.30. P. 1229-1248.
7. M. Nakamura, T. Sawada. A $k - \varepsilon$ model for turbulent analysis of Bingham plastic fluid in a pipe. // *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.* 1986. **B52**. 479. P. 2544-2551.
8. Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности. *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*. 1978. №3. С. 13-25.
9. М.Э. Эглит, А.Е. Якубенко, Т.А. Якубенко. Турбулентные склоновые потоки. Материалы XXII Международной конференции "Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность", 14—21 февраля 2016г., г.Звенигород. Изд-во Московского университета, 2016. Стр.304.
10. М.Э. Эглит, А.Е. Якубенко. Влияние захвата донного материала и неньютоновской реологии на динамику турбулентных склоновых потоков. *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*. 2016. №3.

