

УДК 531/534:57

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В СТЕНОЗИРОВАННОМ КРОВЕНОСНОМ СОСУДЕ: ВЛИЯНИЕ УПРУГОСТИ СТЕНКИ И ЗАКРУТКИ ПОТОКА

© 2011 г.

Я.А. Гатаулин, А.Д. Юхнев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

yakov\_gataulin@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Приведены результаты численного исследования влияния упругости стенки и закрутки потока на формирование застойных зон и распределение сдвиговых напряжений жидкости у стенки для двух моделей стенозированный кровеносный сосуд. Расчеты заложили теоретическую базу конструирования нового гемодинамического тренажера для врачей ультразвуковой доплеровской диагностики.

*Ключевые слова:* биомеханика кровообращения, вычислительная гидродинамика, стеноз, упругость стенки, закрутка потока, застойная область, сдвиговые напряжения на стенке.

Клинические исследования показывают, что атеросклеротические образования находятся в основном в застойных областях с низкими уровнями касательных напряжений. Таким образом, детальное понимание локальной гемодинамики и ее влияния на механику сосудистой стенки исключительно полезно в клинических приложениях. В данном контексте численное моделирование является ценным инструментом.

Известно, что уменьшение упругости сосудов оказывает влияние на структуру кровотока [1]. Этот эффект исследуется на примере течения в асимметричном стенозе.

Рассмотрено пульсирующее движение вязкой несжимаемой жидкости в модели стенозированного сосуда в виде упругой трубки с диаметром 6 мм и длиной 138 мм с асимметричным 50%-м местным сужением. Толщина стенки составляла 0.5 мм, а ее модуль упругости варьировался в диапазоне от 0.4 до 4 МПа. На входе задавалась близкая к физиологической кривая расхода с амплитудой пульсаций 650 мл/мин, а на выходе – кривая давления с амплитудой пульсаций 20 мм ртутного столба.

Для случая наиболее жесткого сосуда показано, что за стенозом формируется застойная область протяженностью примерно два диаметра сосуда, в фазе уменьшения расхода ниже по течению на противоположной стороне образуется вторая, меньшая по ширине, область рециркуляционного течения. В фазе минимального расхода застойная область уменьшается. Касательные напряжения на стенке модели перед стенозом плавно уменьшаются (до двух раз), а в области стено-

за возрастают в 20 раз в виде узкого пика. За стенозом касательные напряжения малы и имеют отрицательные значения на протяжении всей застойной области. На противоположной стороне стеноза пик касательных напряжений имеет вдвое меньшую амплитуду и впятеро большую протяженность по длине сосуда.

Уменьшение модуля упругости стенки от 4 до 0.4 МПа приводит к значительному увеличению амплитуды пульсации стенки перед стенозом - от 4 до 30% радиуса нерастянутого сосуда, к уменьшению пикового значения касательных напряжений  $\tau_w$  на стенке со стороны стеноза на 15% и к уменьшению амплитуды отрицательных значений касательных напряжений на стенке застойной области на 60% (рис. 1).

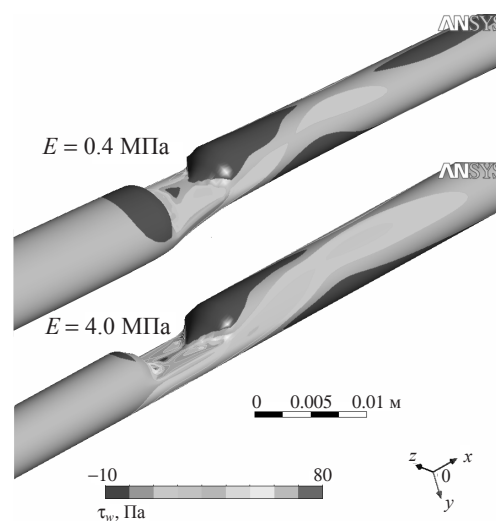


Рис. 1

В современной литературе имеются сведения о наличии вращения потока крови в сосудах человека [2]. Однако влияние закрутки на кровоток остается мало изученным.

В описанной выше геометрии для случая жесткого сосуда рассмотрено стационарное движение вязкой несжимаемой жидкости. На входе задавался поток, закрученный по квазитвердому закону, с постоянным расходом 650 мл/мин, на выходе – постоянное давление. Угол  $\alpha$  закрутки потока (отношение периферической окружной скорости к продольной скорости) варьировался в диапазоне от 0 до 20°.

Течение при угле закрутки 10° является слабо закрученным и практически не отличается от течения без закрутки. С увеличением закрутки потока до 20° протяженность застойной области за стенозом уменьшается примерно в два раза, а ее граница смещается в сторону, ориентируясь вдоль винтообразных линий тока жидкости (рис. 2).

*Исследования поддержаны Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (грант № 14964 программы СТАРТ-2011).*

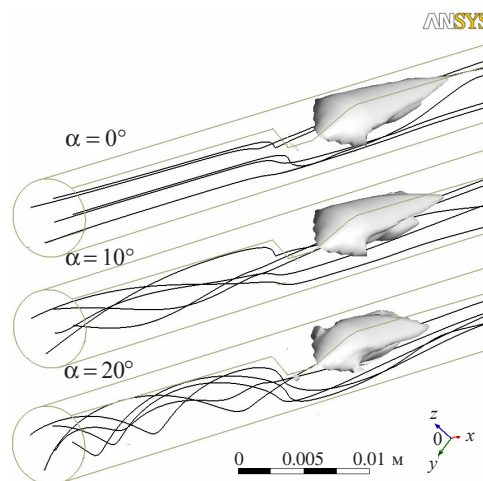


Рис. 2

#### Список литературы

1. Friedman M., Krams R., Chandran K. Flow interactions with cells and tissues: cardiovascular flows and fluid-structure interactions // Ann. of Biomed. Eng. 2010. V. 38, No 3. P. 1188–1203.
2. Кизилова Н.Н. // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Акт. пробл. механики. Естеств. науки. Спецвыпуск. 2009. С. 76–82.

#### NUMERICAL SIMULATION OF FLOWS IN BLOOD VESSEL STENOSIS: EFFECTS OF WALL ELASTICITY AND SWIRLING FLOW

*Y.A. Gataulin, A.D. Yukhnev*

The effects of wall elasticity and swirling flow on stagnation zone formation and wall shear stresses distribution for the models of blood vessel stenosis are numerically investigated. The analysis has been conducted for constructing new hands-on simulator for training in blood flow ultrasonic diagnostics.

*Keywords:* circulation biomechanics, computational fluid dynamics, stenosis, wall elasticity, swirling flow, stagnation zone, wall shear stresses.