

УДК 532.5.073

## БАЗОВЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

А. М. Сорокин\*, А. В. Бойко<sup>\*,\*\*</sup>, А. А. Тулупов<sup>\*\*\*,\*\*\*\*</sup>,  
А. П. Чупахин<sup>\*\*\*\*,\*\*\*\*\*</sup>

\* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\*\* Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия

\*\*\* Международный томографический центр СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\*\*\*\* Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

\*\*\*\*\* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

E-mails: am\_sorokin@ngs.ru, boiko@itam.nsc.ru, taa@tomo.nsc.ru, chupakhin@hydro.nsc.ru

Представлено описание стенда, предназначенного для изучения пульсирующих течений жидкости в каналах, в случае когда форма пульсаций давления задается перемещением поршня, управляемым с помощью шагового двигателя, а минимальный шаг поршня составляет 6 мкм.

Ключевые слова: пульсирующие течения, каналы, гемодинамика, автоматизированный измерительный комплекс.

DOI: 10.15372/PMTF20180621

**Введение.** При проведении исследований в области гемодинамики большое внимание уделяется изучению пульсирующих течений жидкости. Для выполнения экспериментальных исследований подобных течений требуются специальные стенды (см., например, [1–6]). При этом опыт работы с одним из таких стендов (CompuFlow 1000 MR фирмы Shelley Medical Imaging Technologies) [7] показывает, что необходимо обеспечить высокую повторяемость формы возмущений и надежность работы стенда в течение длительного времени при использовании различных жидкостей, пригодных для проведения экспериментов с применением методов магниторезонансной томографии (МРТ), панорамной трассерной визуализации (PIV) и т. п., а также модульность конструкции для оперативной замены различных компонентов стенда в зависимости от рассматриваемой задачи.

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (ИТПМ) СО РАН имеется опыт создания автоматизированных измерительных комплексов (АИК) для выполнения аэродинамических исследований ламинарно-турбулентного перехода [8–10]. Эти комплексы хорошо зарекомендовали себя в течение длительного времени эксплуатации [11–15], поэтому для повышения эффективности и результативности гемодинамических исследований в настоящее время на базе ИТПМ СО РАН в сотрудничестве с Институтом гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН и Международным томографическим центром СО РАН создается АИК для изучения пульсирующих течений жидкости.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 17-11-01156).

© Сорокин А. М., Бойко А. В., Тулупов А. А., Чупахин А. П., 2018

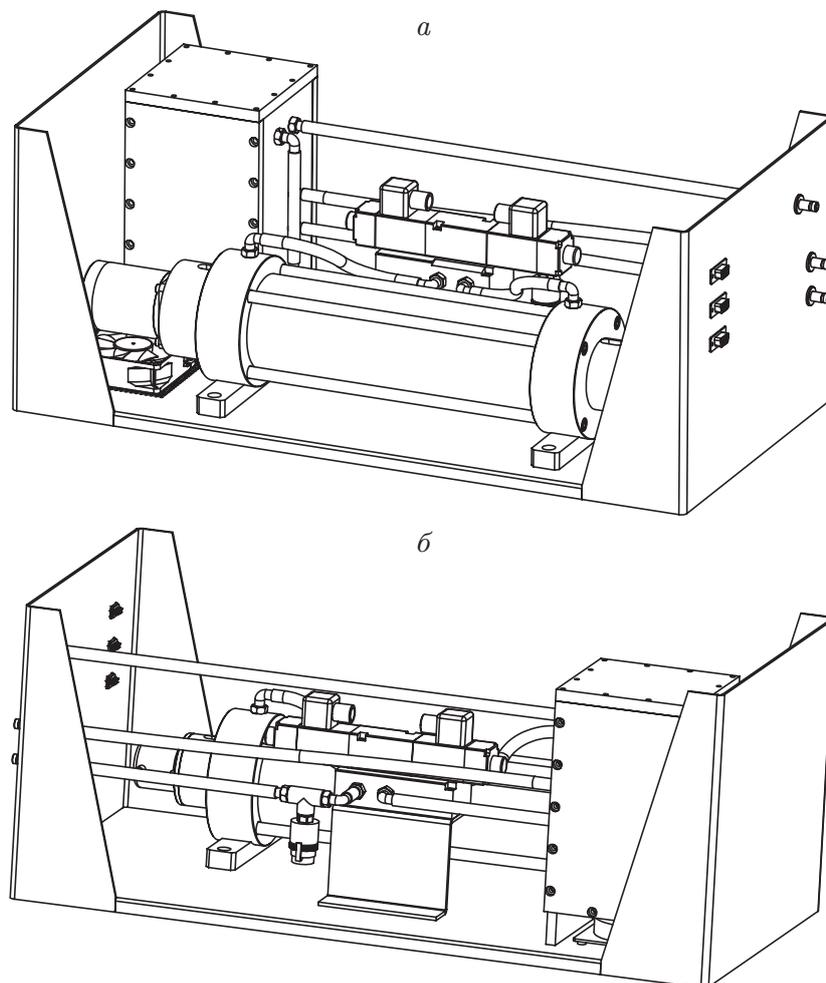


Рис. 1. Базовый стенд для изучения пульсирующих течений жидкости:  
*a* — вид спереди, *b* — вид сзади

В настоящей работе описываются основные особенности стенда и обосновываются его преимущества по сравнению с существующими конструкциями с учетом предполагаемых задач и методов исследований. Система управления (компьютерные программы) и результаты тестирования будут представлены в одной из следующих работ.

**Описание стенда.** Составной частью АИК является базовый стенд, модульная конструкция которого позволяет по мере необходимости наращивать его потенциал (рис. 1).

Основу стенда составляет гидравлический поршневой насос (помпа), имеющий некоторые особенности. Поскольку этот насос предполагается использовать в экспериментах с применением МРТ, в его конструкции минимизировано количество металлических элементов. Для визуального контроля движения жидкости в помпе (в частности, для обеспечения отсутствия пузырьков газа) рабочий цилиндр насоса изготавливается из оптически прозрачного плексигласа, что значительно усложнило процесс его создания. Для получения необходимой чистоты рабочей поверхности цилиндра, уменьшения его эллипсности и конусности до 20 мкм потребовалось изготовить притир, на котором с помощью абразивных паст проводилась обработка внутренней поверхности цилиндра. Внутри рабочего цилиндра с помощью ходового винта перемещается поршень.

Движение поршня как слева направо, так и обратно является рабочим, т. е. при любом направлении движения поршня нагнетаемое им давление используется для создания течения в исследуемом канале. На внешней поверхности поршня имеется система уплот-

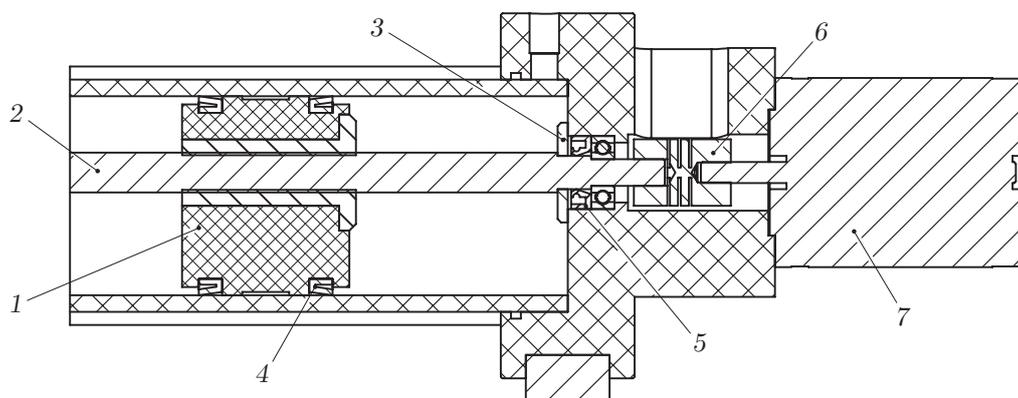


Рис. 2. Система уплотнения:

1 — поршень, 2 — ходовой винт, 3 — упругий золотник, 4 — воротниковая манжета, 5 — сальник, 6 — эластичная муфта, 7 — шаговый двигатель

нения, состоящая из двух воротниковых манжет, ориентированных в противоположные относительно друг друга стороны (рис. 2). Использование такой системы уплотнения позволяет поршню работать при любом направлении движения. В отличие от аналогичных конструкций в данном гидравлическом насосе использована нестандартная система удержания поршня от поворота вокруг собственной оси. Обычно для этого используется дополнительная направляющая, проходящая сквозь поршень и ограничивающая его вращение. Однако такая схема имеет недостатки. В частности, необходимо применять еще одну систему уплотнения поршень — направляющая, что приводит к увеличению трения и как следствие требует создания больших крутящих моментов на ходовом валу.

В предлагаемой конструкции гидравлического насоса роль направляющей играет ходовой винт, расположенный с небольшим эксцентриситетом относительно оси симметрии рабочего цилиндра. Ходовой винт обоими концами опирается на два подшипника качения, расположенные в торцевых заглушках рабочего цилиндра. В этих заглушках также предусмотрена система уплотнения ходового винта с помощью манжет и упругих лепестковых золотников.

Вращение ходового винта осуществляется с помощью униполярного шагового двигателя FL57ST76, соединенного с ним эластичной муфтой (рис. 3). Для управления шаговым двигателем предполагается использовать контроллер SMSD-4.2 (фирма «Электропривод», Санкт-Петербург). Контроллер позволяет реализовать как автоматический, так и ручной режим управления с помощью выносного пульта (управление скоростью вращения — по аналоговому электрическому сигналу, амплитуда которого может произвольным образом зависеть от времени), а также регулировать такие параметры, как направление, скорость, шаг перемещения, ускорение и крутящий момент. Минимальный угол поворота шагового двигателя составляет  $1/200$  полного оборота, однако применение контроллера SMSD-4.2 позволяет дробить его еще 16 раз (микрошаговый режим). Поскольку шаг резьбы ходового винта равен 1,25 мм, минимальный шаг перемещения поршня составляет  $6,0 \div 0,4$  мкм в зависимости от величины дробления шага.

Для контроля перемещения поршня в конструкции помпы предусмотрена установка инкрементального энкодера (см. рис. 3), который крепится с помощью эластичной муфты к хвостовику ходового винта. Цифровой сигнал с энкодера подается в систему контроля перемещения, что позволяет отслеживать фактическое положение поршня, скорость его перемещения и при необходимости корректировать их. Таким образом, устройство позволяет создавать потоки, скорость которых зависит от времени произвольным образом, в том числе периодические пульсационные потоки, характерные для задач гемодинамики.

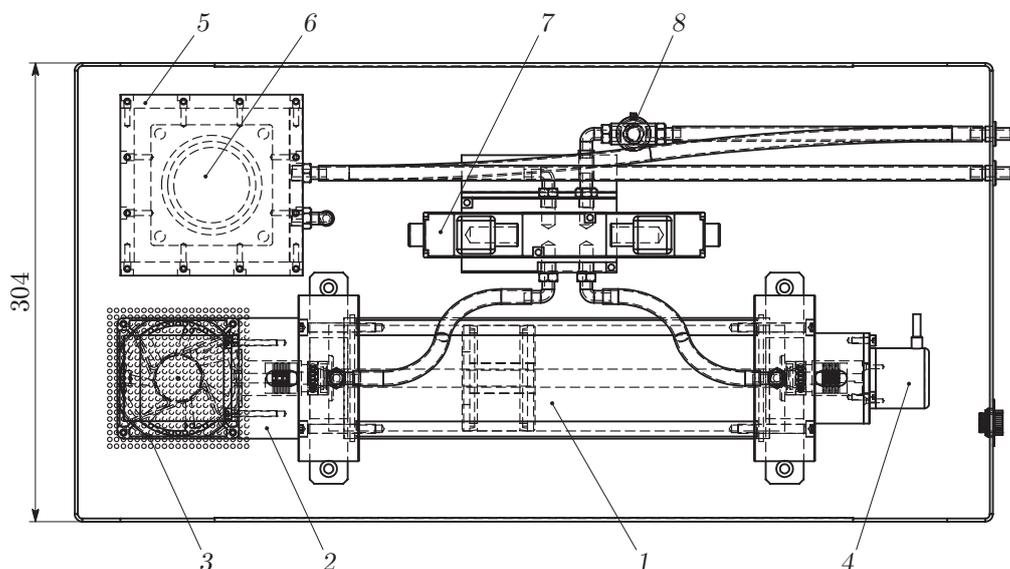


Рис. 3. Основные элементы конструкции стенда:

1 — помпа, 2 — шаговый двигатель, 3 — электроventильатор, 4 — инкрементальный энкодер, 5 — бак, 6 — электропривод, 7 — электромеханический клапан, 8 — датчик предельного давления

Нагнетаемое гидравлическим насосом давление с помощью шлангов высокого давления подается на электромеханический клапан Numatics 239B фирмы ASCO, имеющий две пары входных и выходных каналов. В зависимости от направления движения поршня внутри клапана происходит соответствующее замыкание входных и выходных каналов, что позволяет сохранять постоянное направление движения жидкости в исследуемом канале независимо от направления движения поршня. Кроме того, нагнетаемое поршнем давление контролируется с помощью регулируемого датчика предельного давления (см. рис. 3). При достижении заданного максимального давления в результате нештатной работы гидравлического насоса датчик передает в систему управления сигнал “авария” для экстренной остановки шагового двигателя.

В конструкции гидравлического насоса предусмотрена система удаления пузырьков газа, растворенных в рабочей жидкости. Эта система представляет собой прозрачный резервуар, внутри которого расположена вращающаяся крыльчатка. Медленное вращение крыльчатки приводит к всплыванию пузырьков газа и отводу их в атмосферу через специальный канал.

При проектировании стенда особое внимание уделялось возможности его дальнейшей модернизации и ремонтпригодности. Модульность конструкции с возможностью замены отдельных элементов и использования по возможности отечественных комплектующих позволит в дальнейшем оперативно проводить обслуживание, ремонт и модернизацию стенда. Наличие в конструкции стенда элементов из плексигласа накладывает ограничение на выбор рабочих жидкостей, которые должны быть химически нейтральными по отношению к плексигласу. Однако возможность замены цилиндра гидравлического насоса на аналогичный цилиндр из нержавеющей металлов делает выбор рабочей жидкости практически неограниченным.

**Заключение.** Таким образом, разработан и изготовлен базовый стенд для изучения пульсирующих течений жидкости, по техническим характеристикам не уступающий существующим аналогам [1]. Модульная конструкция стенда дает возможность совершенствовать методику исследований гемодинамических течений. В частности, стенд позво-

ляет использовать различные способы измерения параметров потока, что способствует повышению надежности и точности получаемых данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Frayne R., Holdsworth D. W., Gowman L. M., et al.** Computer-controlled flow simulator for MR flow studies // *J. Magnet. Resonance Imaging*. 1992. V. 2, N 5. P. 605–612.
2. **Steinman D. A., Frayne R., Zhang X. D., et al.** MR measurement and numerical simulation in an end-to-side anastomosis of steady flow model // *J. Biomech.* 1996. V. 29, N 4. P. 537–542.
3. **Thorne M. L., Poepping T. L., Nikolov H. N., et al.** In vitro Doppler ultrasound investigation of turbulence intensity in pulsatile flow with simulated cardiac variability // *Ultrasound Med. Biol.* 2009. V. 35, N 1. P. 120–128.
4. **Денисенко Н. С., Янченко А. А., Черевко А. А. и др.** Моделирование движения жидкости в упругом тройнике // Тез. докл. Всерос. конф. “Нелинейные волны: теория и новые приложения”, посвящ. 70-летию со дня рожд. чл.-кор. РАН В. М. Тешукова, Новосибирск, 29 февр. — 2 марта 2016 г. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 2016. С. 44–45.
5. **Бойко А. В., Акулов А. Е., Чупахин А. П. и др.** Измерение скорости потока вязкой жидкости и его визуализация двумя магниторезонансными сканерами // *ПМТФ*. 2017. Т. 58, № 2. С. 26–31.
6. **Хе А. К., Черевко А. А., Чупахин А. П. и др.** Мониторинг гемодинамики сосудов головного мозга // *ПМТФ*. 2017. Т. 58, № 5. С. 7–16.
7. **Denisenko N. S., Chupakhin A. P., Khe A. K., et al.** Experimental measurements and visualisation of a viscous fluid flow in Y-branching modelling the common carotid artery bifurcation with MR and Doppler ultrasound velocimetry // *J. Phys: Conf. Ser.* 2016. V. 722. P. 012013.1–012013.8.
8. **Грек Г. Р., Бойко А. В., Гилев В. М. и др.** Автоматизированное управление координатным устройством аэродинамической трубы // *Международ. журн. эксперим. образования*. 2013. № 11. С. 155–156.
9. **Бойко А. В., Гилев В. М., Грек Г. Р. и др.** Создание координатного устройства для аэродинамической трубы // *Юж.-Сиб. науч. вестн.* 2014. № 1. С. 13–16.
10. **Грек Г. Р., Бойко А. В., Гилев В. М. и др.** Автоматизированная система сбора термоанемометрической информации в аэрофизическом эксперименте // *Международ. журн. прикл. фундам. исслед.* 2014. № 5. С. 11–14.
11. **Boiko A. V., Grek G. R., Sboev D. S.** Spectral analysis of localized disturbances in boundary layer at subcritical Reynolds numbers // *Phys. Fluids*. 2003. V. 15, N 12. P. 3613–3624.
12. **Бойко А. В., Довгаль А. В.** Развитие стационарной полосчатой структуры в локальной зоне отрыва пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2004. Т. 11, № 1. С. 23–31.
13. **Бойко А. В., Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Немодовое нарастание стационарных возмущений ламинарного течения в зоне отрыва пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. Т. 18, № 1. С. 109–115.
14. **Бойко А. В., Иванов А. В., Качанов Ю. С., Мищенко Д. А.** Исследование слабонелинейного развития нестационарных вихрей Гертлера // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17, № 4. С. 487–514.
15. **Лохов Д. С., Бойко А. В., Сбоев Д. С.** Управление развитием стационарных продольных структур в пограничном слое на плоской пластине с помощью риблет // *ПМТФ*. 2005. Т. 46, № 4. С. 47–54.