



Исследование влияния разной сетки на численное моделирование гемосовместимости в роторном насосе крови

Романова Александра Николаевна

Тельшев Дмитрий Викторович



Институт
биомедицинских систем
НИУ МИЭТ

XV конференция «Математические модели и численные методы в биологии и медицине»

Аппарат вспомогательного кровообращения

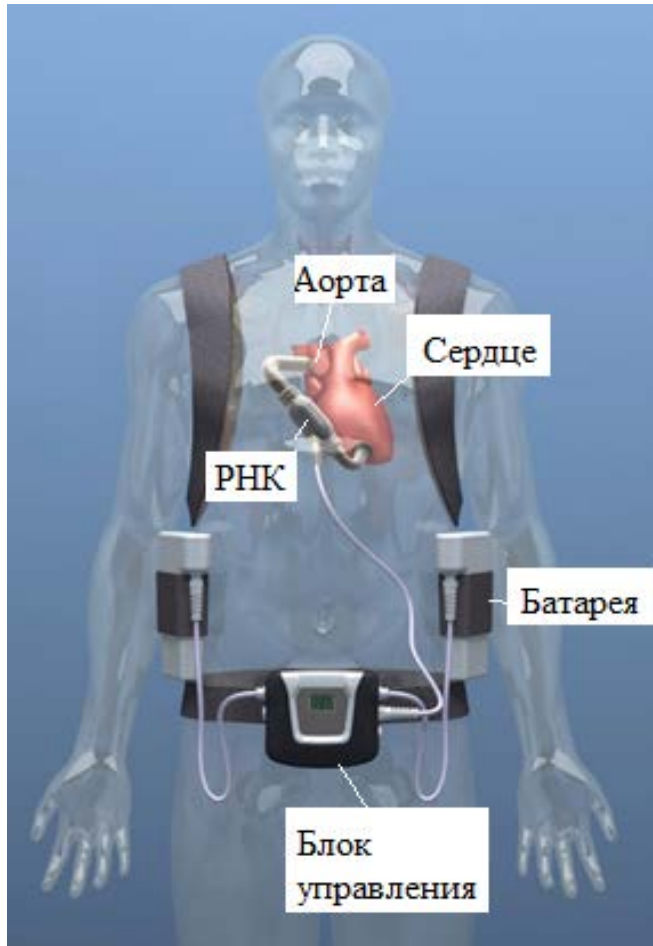


Рис.1. Вариант имплантации аппарата вспомогательного кровообращения Спутник (АВК-Н Спутник) на модели человека

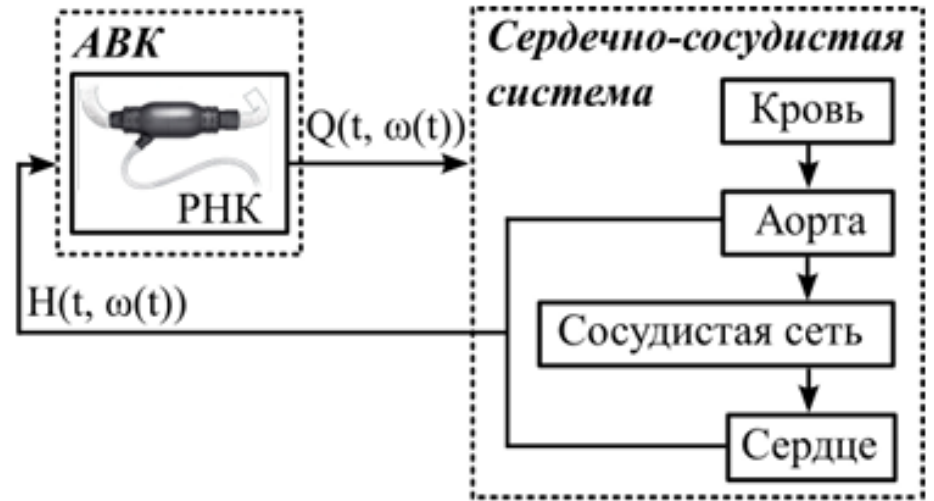


Рис.2. Представление аппарата вспомогательного кровообращения (АВК) в виде системы, образованной роторным насосом крови (РНК) и сердечно-сосудистой системой; $Q(t)$ – расход насоса, $\omega(t)$ – скорость вращения ротора насоса, $H(t)$ – перепад давления в насосе, t – время

Характеристики АВК-Н Спутник

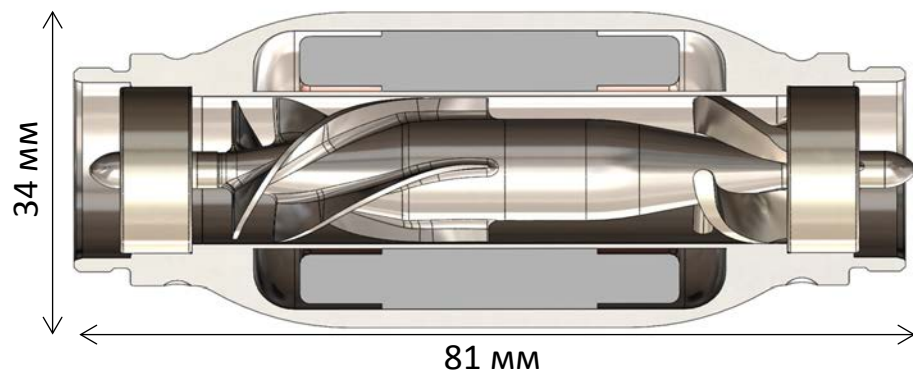


Рис.1. Дизайн насоса АВК-Н Спутник



Рис.2. Внешний вид ротора и спрямляющего аппарата

Диаметр рабочего колеса	15,6 мм
Масса насоса	246 г
Время работы от автономного источника питания	от 6 до 8 ч
Энергопотребление	8 Вт
Скорость вращения ротора	4000–10000 об/мин
Производительность	5 л/мин при давлении 80 мм рт.ст.

Осложнения при использовании АВК

Кровотечение	Инфекция	Тромбоз в насосе	Инсульт
• 50-85%	• 30-50%	• 2-9%	• 10-15%

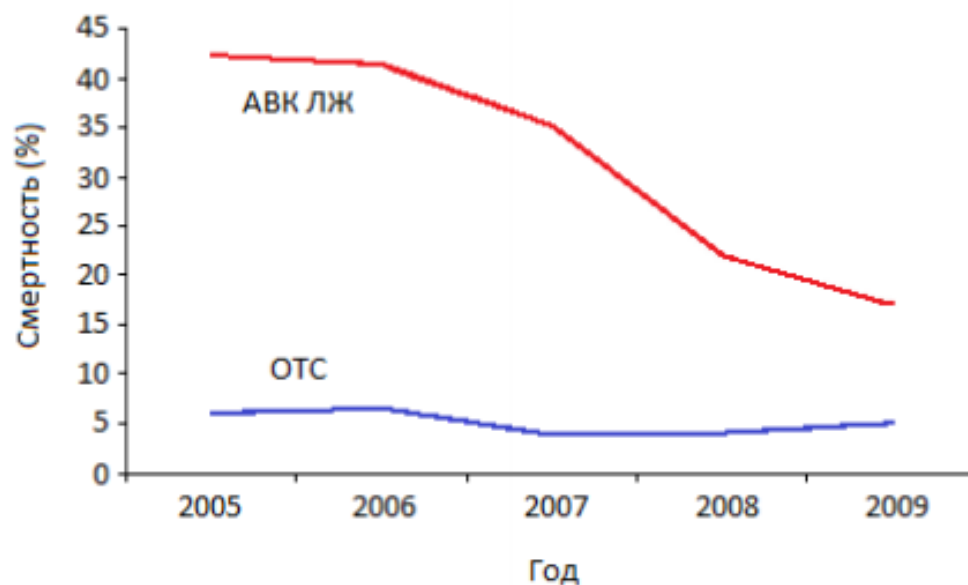
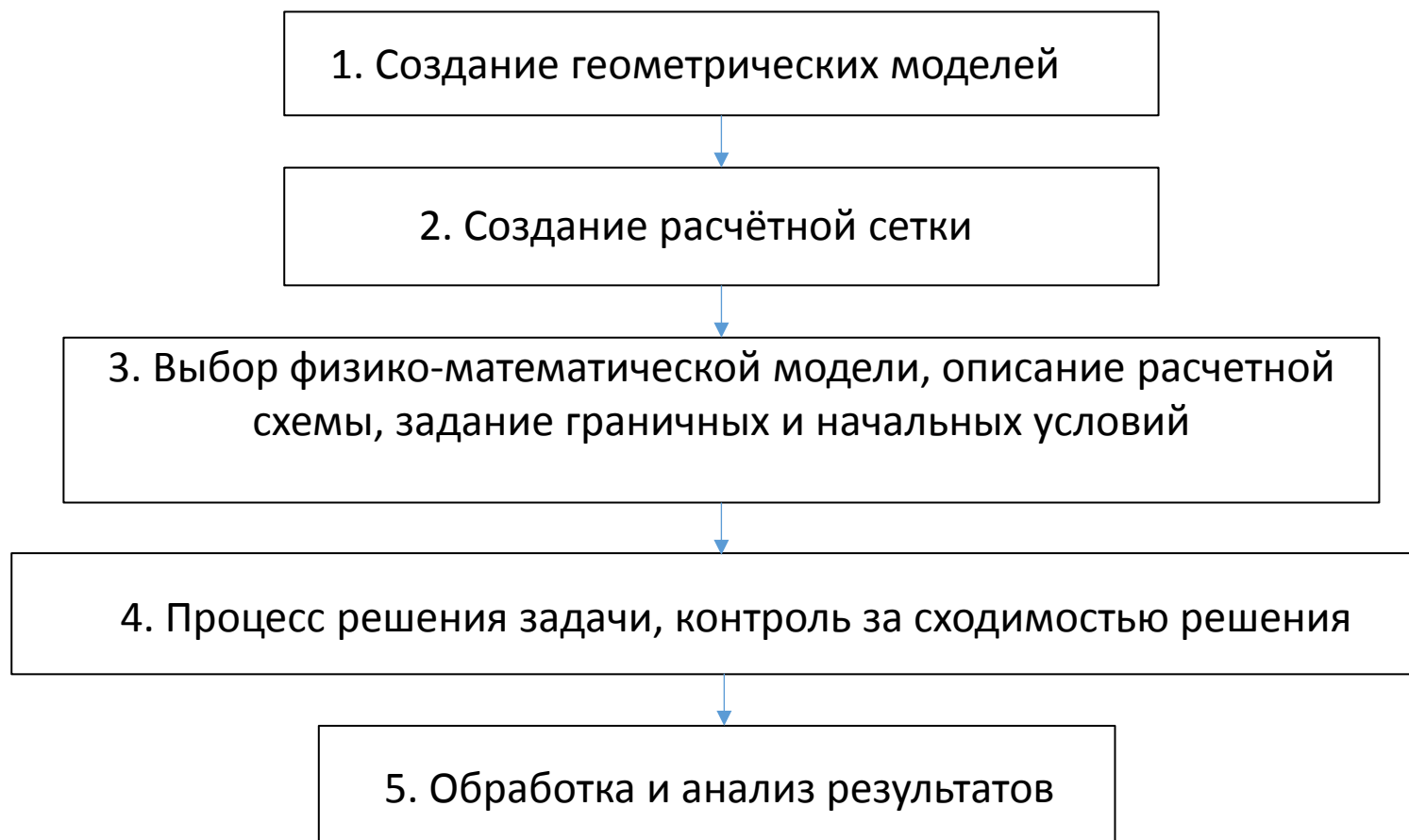


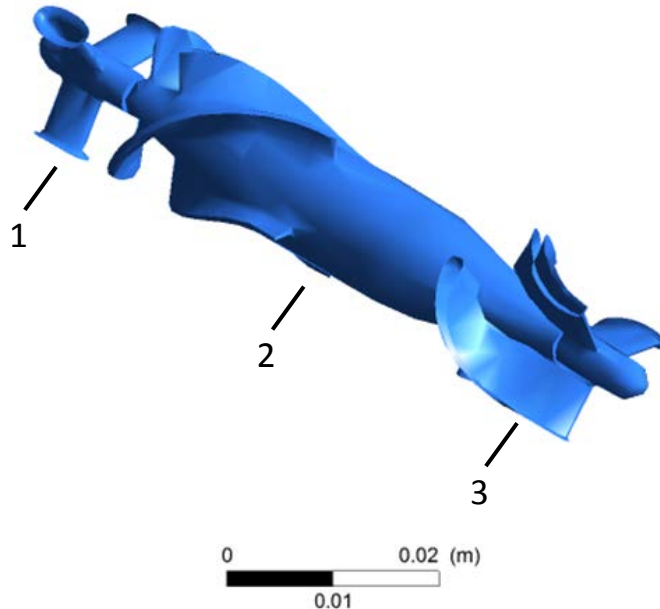
Рис.1. Общий коэффициент смертности в условиях стационара, показывающий процент пациентов, умерших во время учётной госпитализации как при ортотопической трансплантации сердца (ОТС), и при имплантации аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка (АВК ЛЖ) с 2005 по 2009 год

Алгоритм численного моделирования потока крови в аппарате вспомогательного кровообращения

Целью данной работы является исследование влияния различных конфигураций сетки на параметры гемосовместимости в аппарате вспомогательного кровообращения с помощью численного моделирования в программном комплексе ANSYS.



Проектирование модели внутренних частей роторного насоса крови



1 – направляющий аппарат, 2 – ротор,
3 – спрямляющий аппарат

Рис.1. Геометрическая модель
внутренних частей насоса АВК-Н Спутник

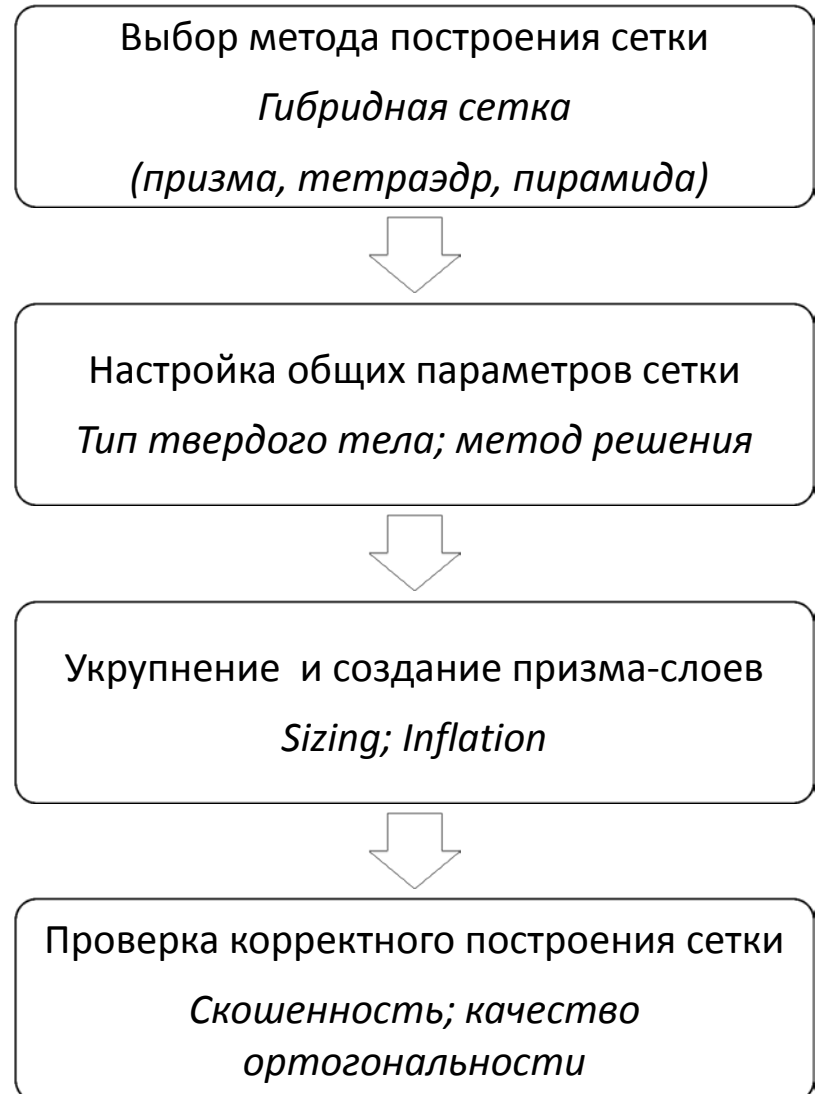


Рис.2. Этапы генерации сетки насоса

Анализ качества ячеек

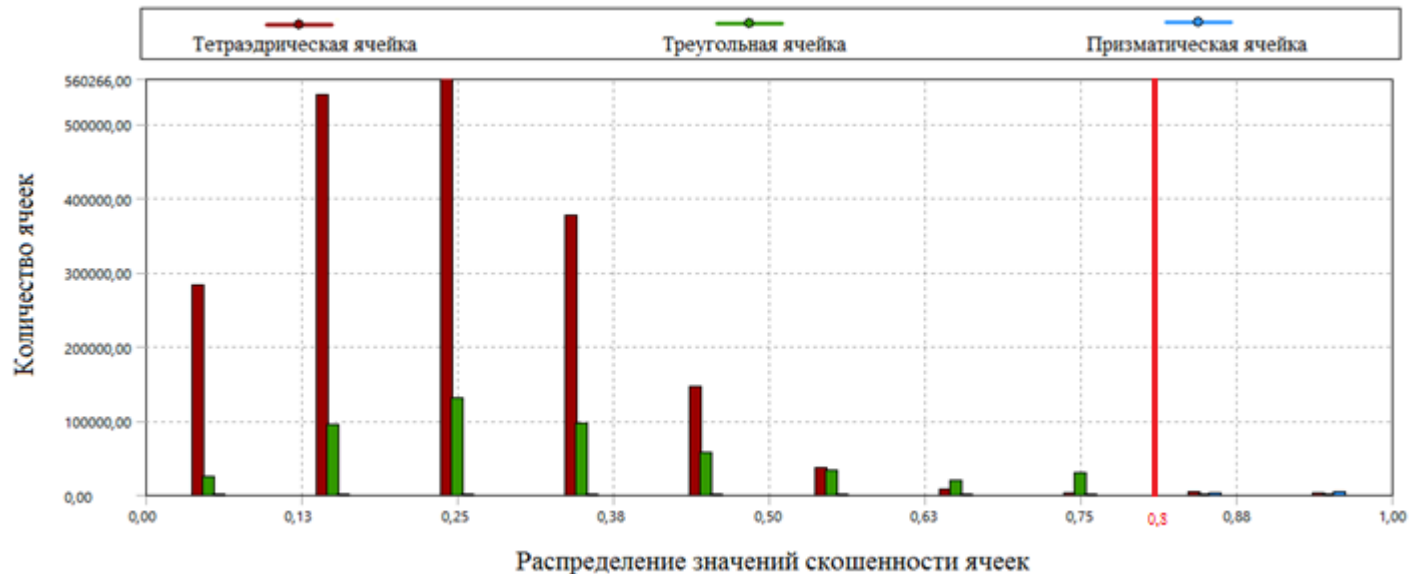


Рис.1. Распределение значений качества скошенности по количеству ячеек во всей расчётной области насоса; красная линия – граница удовлетворительных результатов



Рис.2. Распределение значений качества ортогональности по количеству ячеек во всей расчётной области насоса; красная линия – граница удовлетворительных результатов

Оптимизация сетки в моделировании потока в аппарате вспомогательного кровообращения

Таблица 1. Вариации сетки в системе механической поддержки кровообращения с помощью Ansys Meshing

Тип сетки	Количество узлов
Крупная	0.6 млн
Средне-крупная	1 млн
Средняя	2.7 млн
Мелкая	4.4 млн

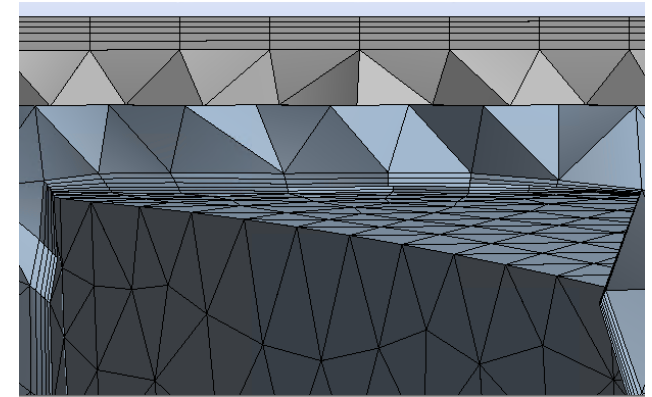


Рис.1. Общий вид области зазора между стенкой корпуса и лопастями ротора для средней сетки

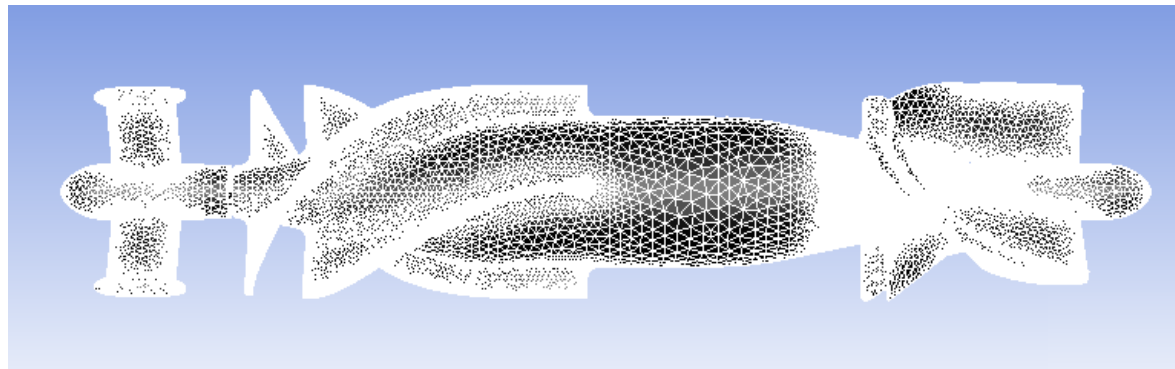


Рис.2. Пример средней расчётной сетки АВК-Н Спутник

Результаты моделирования потока в роторном насосе крови

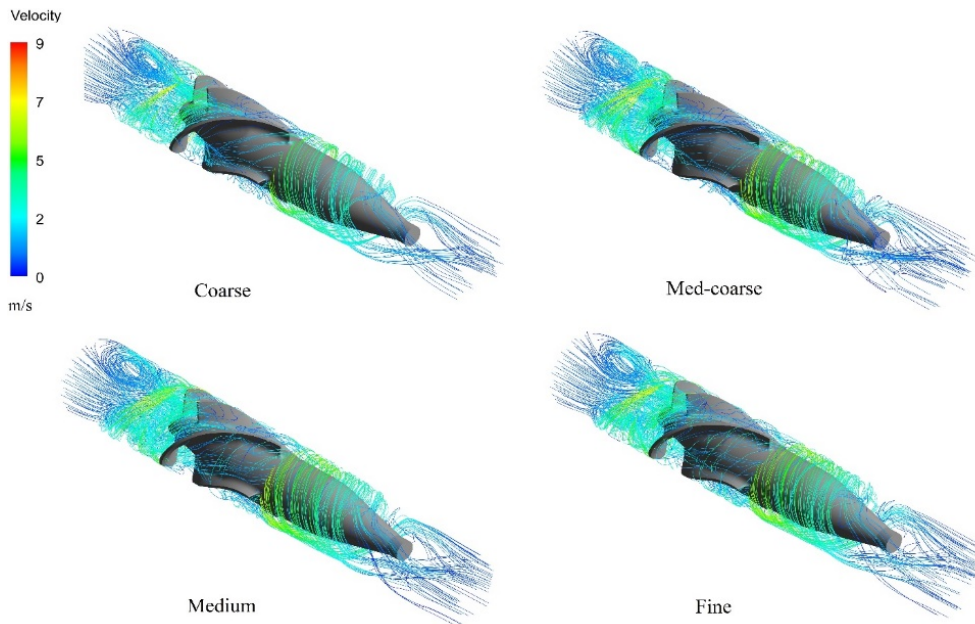


Рис.1. Сравнение полей скоростей АВК Спутник на крупной, средне-крупной, средней и мелкой сетках; скорость потока 5 л/мин при скорости вращения ротора 8000 об/мин и перепаде давления 80 мм.рт.ст.

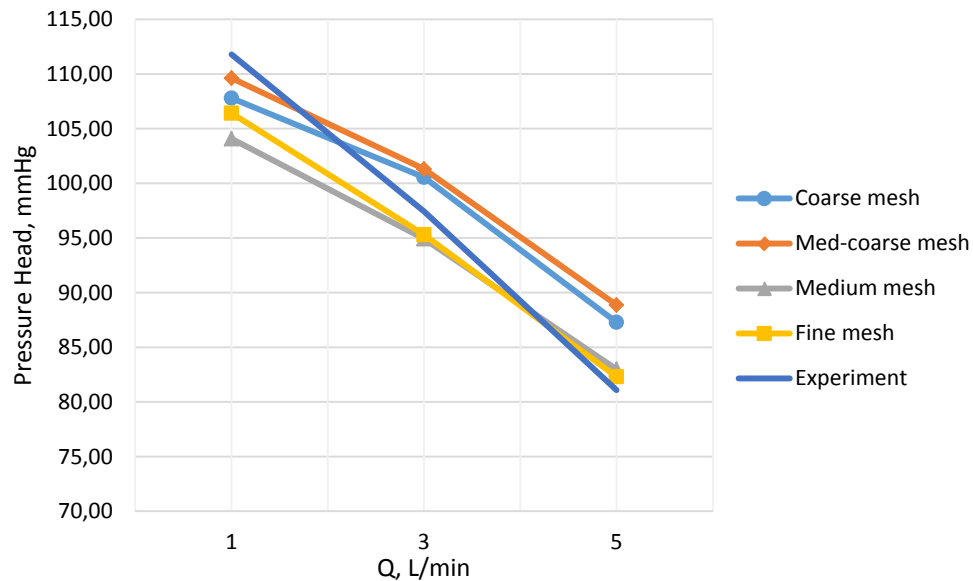


Рис. 2. Расходно-напорные характеристики

Выбранные параметры для численного моделирования в программном комплексе Ansys CFX

Модель турбулентности

- k- ω SST модель

Рабочий режим насоса

- 8000 об/мин
- 5 л/мин
- 80 мм нт ст

Граничные условия

- На входе был установлен массовый расход равный 5 л/мин.
- Давление на выходе было установлено на уровне 0 Па.
- Скорость насоса была установлена на 8000 об/мин

Метод вращения ротора

- Метод множественных систем отсчета (MRF).

Расчеты были выполнены с учетом вращения лопастей импеллера, также известного как подход "rotor-stator"

Параметры крови

- Постоянная вязкость = 0,0035 кг/(м•с)
- Средняя постоянная плотность = 1055 кг/м

Вычисление напряжения сдвига в моделировании потока системы механической поддержки кровообращения

Расчет скалярного напряжения сдвига τ :

$$\tau = \left(\frac{1}{3}(\tau_{ii}^2 + \tau_{jj}^2 + \tau_{kk}^2) - \frac{1}{3}(\tau_{ii}\tau_{jj} + \tau_{jj}\tau_{kk} + \tau_{kk}\tau_{ii}) + (\tau_{ij}^2 + \tau_{jk}^2 + \tau_{ki}^2) \right)^{1/2}$$

Таблица 1. Активация компонентов крови в зависимости от порогового напряжения сдвига

Активация элементов крови	Пороговое напряжение сдвига, Па
Деградация vFW*	9
Активация тромбоцитов	50
Гемолиз	150

*Фактор фон Виллебранда

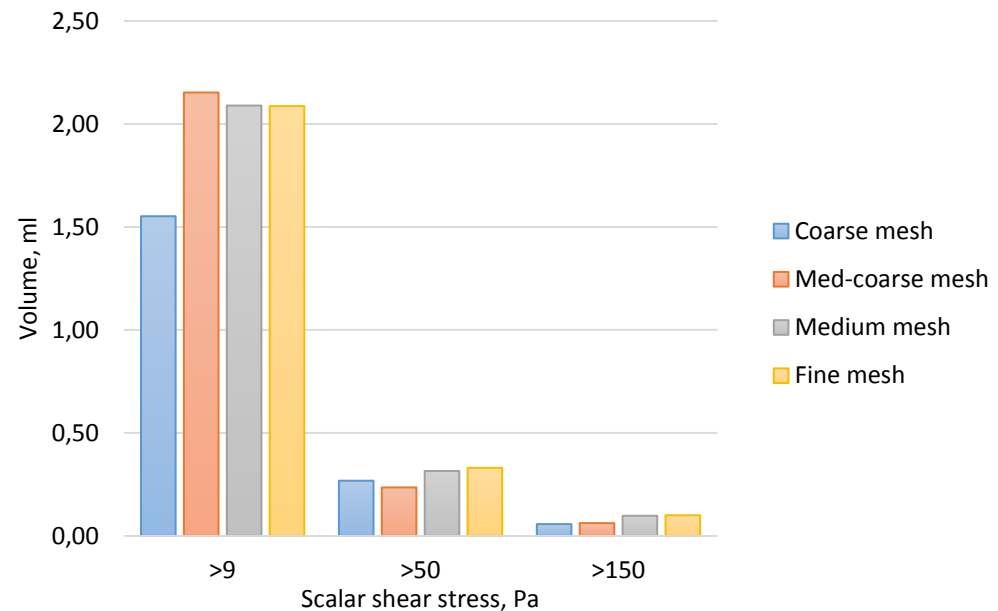


Рис.1. Сравнение объемов скалярного напряжения сдвига для АВК Спутник с крупной, средне-крупной, средней и мелкой сетками

Численное и экспериментальное исследование гемосовместимости в двух поколениях АВК-Н Спутник

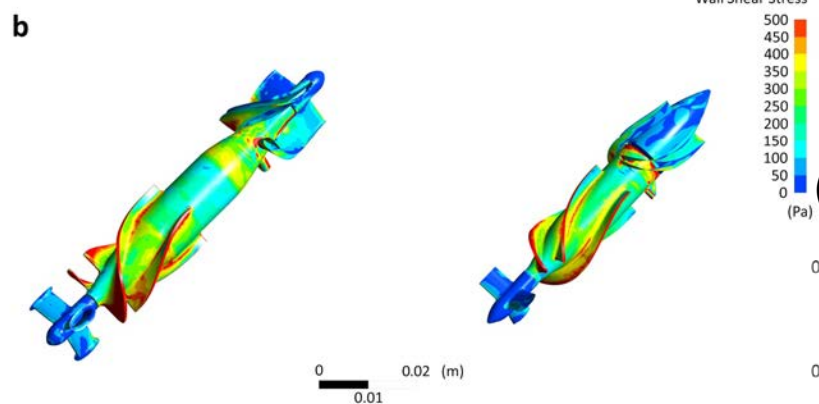
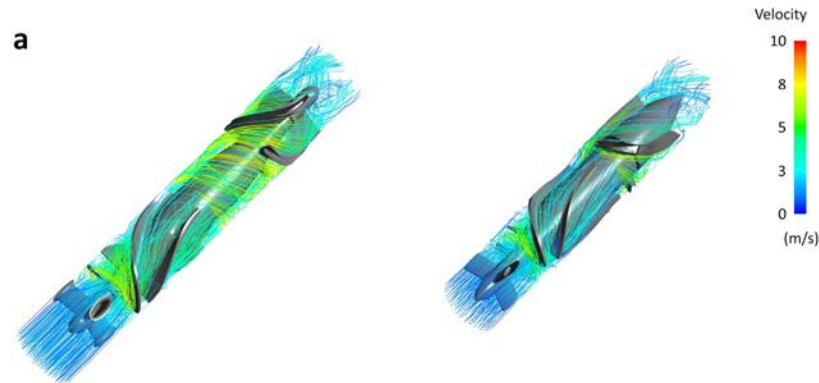


Рис. 1. Характеристики потока АВК «Спутник-1» (слева) и «Спутник-2» (справа) в рабочей точке с расходом 5 л/мин и напором 100 мм рт.ст. при частоте вращения рабочего колеса 9100 об/мин: (а) линии тока; (б) пристеночные сдвиговые напряжения.

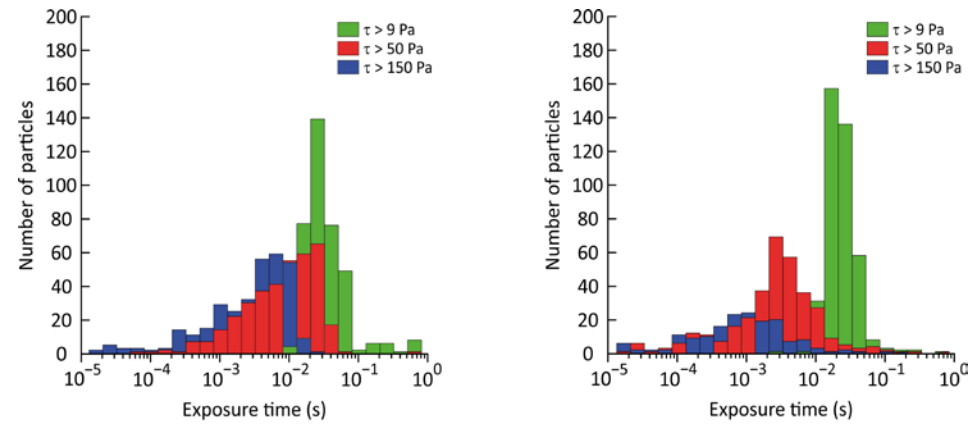


Рис.2. Распределение частиц, подвергшихся скалярным напряжениям сдвига выше 9 Па (зеленый), 50 Па (красный) и 150 Па (синий): (а) Спутник 1; и (б) Спутник-2.

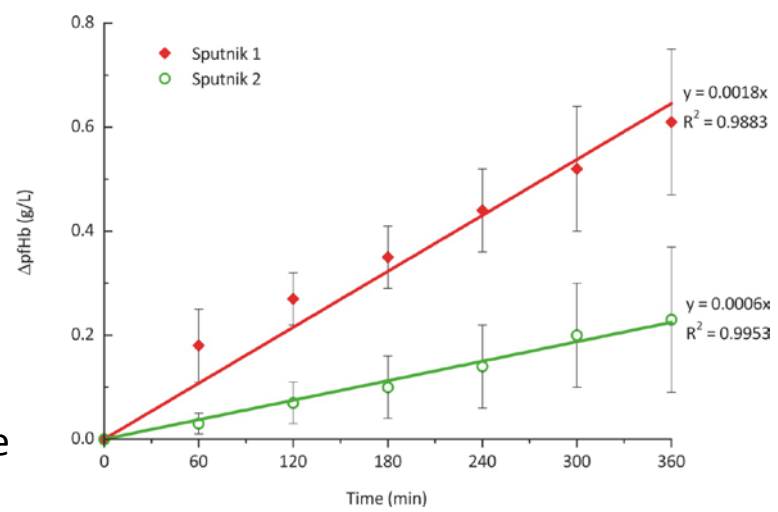


Рис. 3. Изменение концентрации свободного гемоглобина в плазме для «Спутник-1» и «Спутник-2» соответственно.

Индекс гемолиза

Повреждение частицы p за временной шаг s : $d_{p,s} = 1.8 \cdot 10^{-6} \tau_s^{1.991} \Delta t_s^{0.765}$

Повреждение частицы через насос: $D_{p,s} = D_{p,s-1} + (1 - D_{p,s-1})d_{p,s}$

Среднее повреждение всех частиц (индекс гемолиза): $E = \sum_{p=1}^N \frac{D_p}{N}$

Рабочая точка:

4,5 л/мин с напором 80 мм.рт.ст. при скорости вращения ротора 8000 об /мин.

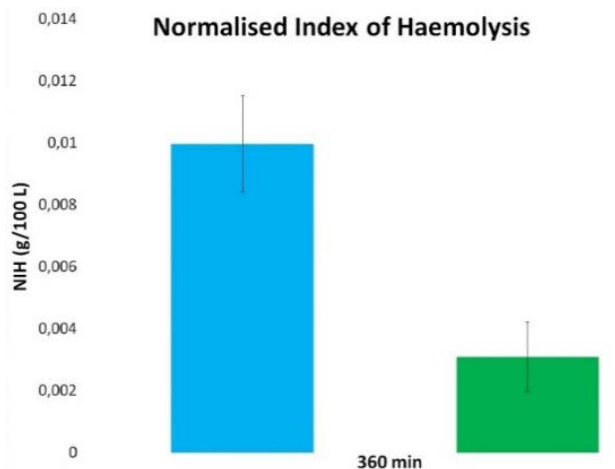


Рис.1. Экспериментальный уровень гемолиза для роторных насосов

Таблица. Основные параметры индекса гемолиза

Параметр	Спутник-1	Спутник-2
Максимальное значение гемолиза, %	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-4}$
Минимальное значение гемолиза, %	$1,40 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$
Среднее значение гемолиза, %	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$2,71 \cdot 10^{-5}$
Стандартное отклонение, %	$4,95 \cdot 10^{-4}$	$3,87 \cdot 10^{-5}$

Формирование управляющего воздействия аппарата вспомогательного кровообращения Спутник

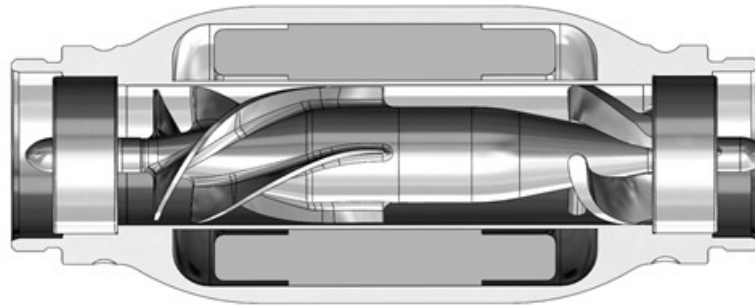


Рис. 1. Конструкция роторного насоса крови в составе носимого аппарата вспомогательного кровообращения Спутник

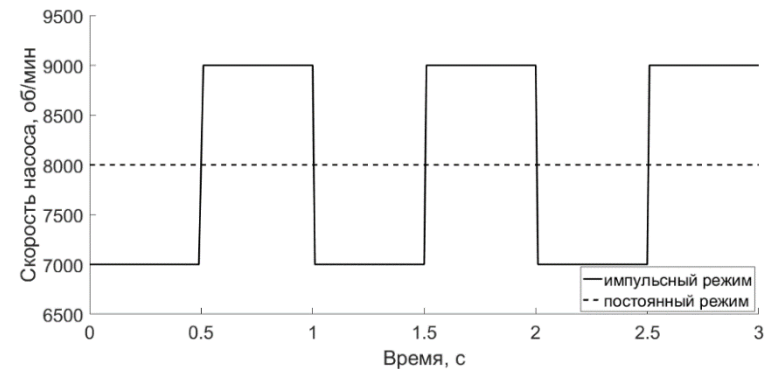


Рис. 3. Режимы работы насоса АВК-Н Спутник при поддержании постоянной и прямоугольной модуляции скорости вращения ротора

Рис. 2. Система управления АВК-Н Спутник с отрицательной обратной связью

Режим работы системы механической поддержки кровообращения при импульсной модуляции скорости насоса

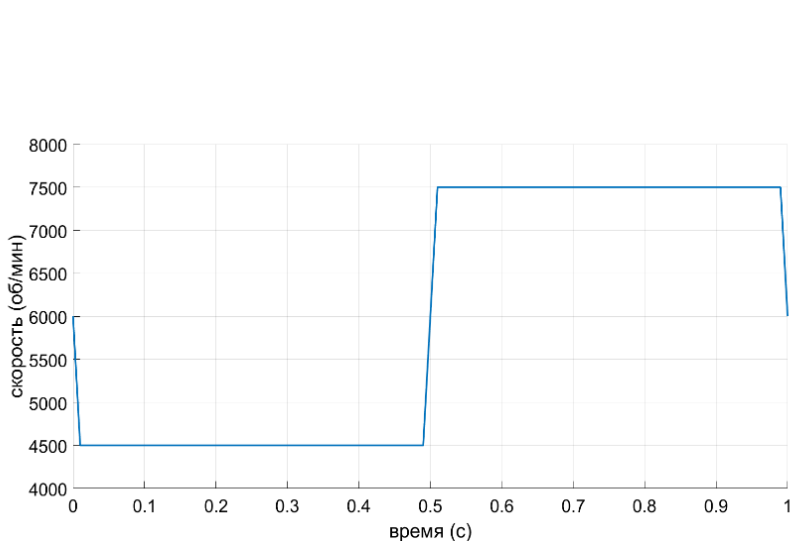


Рис. 1. Профиль скорости насоса на управляющее воздействие импульсной модуляцией

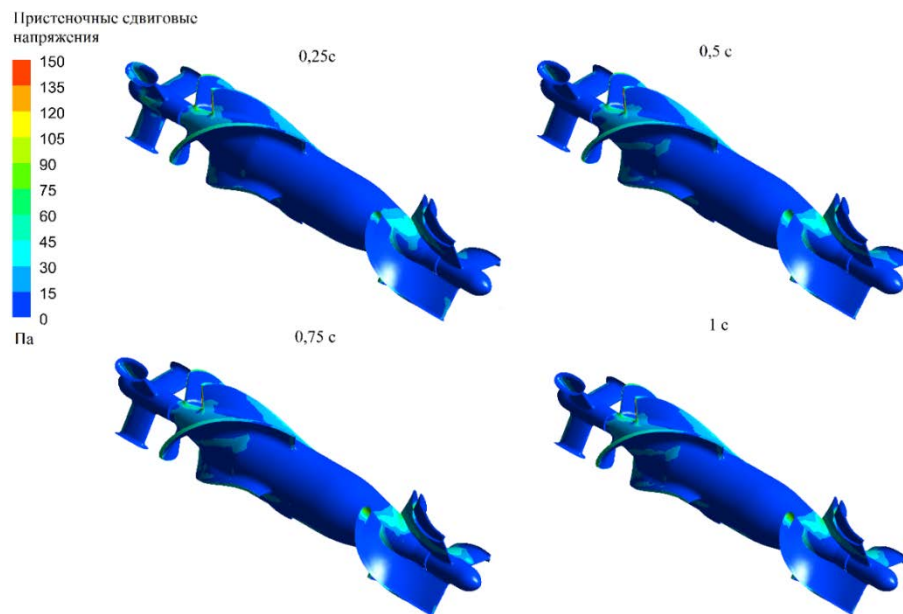


Рис.2. Пристеночные сдвиговые напряжения для АВК-Н Спутник, в четырех дискретных моментах времени в режиме импульсной модуляции скорости

Таблица. Средние показатели индекса гемолиза в различные моменты времени

Момент времени	0.25 с	0.5 с	0.75 с	1 с
Средние показатели индекса гемолиза	$2.4 \cdot 10^{-4}\%$	$8.7 \cdot 10^{-4}\%$	$2.9 \cdot 10^{-4}\%$	$3.1 \cdot 10^{-4}$

Основные результаты и выводы

1. В работе было выполнено моделирование для оценки внутренней гидродинамики и негативного воздействия на форменные элементы крови с помощью АВК-Н Спутник. Значения давления различались в зависимости от конфигураций сеток, что привело к ошибке в 0,84% между средней и мелкой сетками.
2. Получены скалярные напряжения сдвига на поверхностях внутренних элементов роторных насосов, вектора линейной скорости потока и время экспозиции частиц для рабочих точек. Разница в площадях пристеночных сдвиговых напряжений выше 5 Па составляет 2,8% для мелкой и средней сеток, а для напряжений выше 150 Па - 2,1%.
3. Для оценки уровня повреждения vWF, потенциального тромбообразования и повреждения крови рассчитывались объемные распределения скалярных напряжений сдвига. Разница в объемных распределениях между средней и мелкой сетками составляет 0,12%, 4,66% и 2,73% для напряжений сдвига выше 9, 50 и 150 Па соответственно.
4. Проведен анализ качества ячеек при моделировании расчетных областей и найдены оптимальные параметры для быстрой сходимости вычислительного процесса. Средняя конфигурация сетки была выбрана для дальнейших расчетов из-за приемлемого баланса между вычислительными ресурсами и точностью.