

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ВРАЧА ПРИ ОЦЕНКЕ ПРЕДОПЕРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛЬНЫХ С ОСТРЫМИ НАРУШЕНИЯМИ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

С. В. Синдеев, С. В. Фролов, А. Ю. Потлов

*Кафедра «Биомедицинская техника»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
ssindeev@yandex.ru*

Ключевые слова: аневризма; гемодинамика; математическое моделирование гидродинамики; модульная архитектура; церебральное кровообращение.

Аннотация: Предложена система поддержки принятия решений врача для оценки предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями мозгового кровообращения. Система построена на основе модульной архитектуры и может быть интегрирована в медицинские информационные системы. На основе модельного примера определено влияние неньютоновских свойств крови и нарушений общего кровообращения на кровоток в церебральной аневризме.

Оценка предоперационного состояния больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения является комплексной задачей, включающей, в том числе, и оценку кровотока в пораженной области, например в церебральной аневризме. Подобная задача осложнена еще и тем, что доступные клинические методы исследования кровотока, такие как компьютерная томографическая ангиография (КТ-ангиография) и доплер ультразвукового исследования (УЗИ), обладают сравнительно низким пространственным и временным разрешением и не могут быть использованы для точной оценки гемодинамических параметров в интересующей врача области.

Одним из перспективных методов решения данной проблемы является оценка параметров кровотока в области церебральной артерии с помощью методов математического моделирования гемодинамики [1 – 3]. Геометрия церебральной артерии, параметры общего кровообращения и реологические свойства крови пациента определяются клиническими методами и учитываются в математической модели с помощью процедуры индивидуализации. Целью работы является разработка системы поддержки принятия решений (СППР) врача для оценки предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями кровообращения на основе математического моделирования кровотока в церебральных артериях.

Идентификация аневризмы и определение ее параметров с помощью клинических методов. Для предварительной локализации церебральных аневризм предлагается использовать авторский алгоритм определения с помощью импульсной диффузионной оптической томографии (ДОТ) координат центров и эффективных радиусов для областей патологических отклонений в структуре биологической ткани, отличающийся формированием начального приближения к пространствен-

ным распределениям коэффициентов поглощения и рассеяния по индексу неоднородности, а также предположением о сферической форме и гомогенности по значениям параметров поглощения и рассеяния всех оптических неоднородностей в исследуемом биомедицинском объекте. Такой подход позволяет производить быстрые (менее 1 мин с учетом времени, необходимого на закрепление эластичного браслета с портами инъектирования и детектирования излучения на голове пациента), безопасные и относительно дешевые скрининговые обследования церебральных аневризм. Поскольку коэффициент поглощения крови для используемых в импульсной ДОТ длин волн зондирующего излучения 700...900 нм значительно выше $\mu_a = 0,12...0,25 \text{ мм}^{-1}$ коэффициента поглощения тканей головы человека в целом $\mu_a = 0,05...0,08 \text{ мм}^{-1}$, наполненная кровью церебральная аневризма на их фоне будет представлять собой четко выраженную поглощающую неоднородность и вызывать существенное снижение интенсивности времени разрешенного сигнала на ближайших к этой неоднородности детекторах ДОТ-системы. Пространственное разрешение современных систем для импульсной ДОТ варьируется в диапазоне 2...4 мм, что значительно выше среднего размера церебральной аневризмы 4...15 мм.

Если в результате скринингового ДОТ исследования возникает подозрение о наличии аневризмы, то дополнительно проводятся исследования с помощью методов КТ-ангиографии и магнитно-резонансная томография (МРТ). Подобные исследования позволяют с высокой точностью определить наличие или отсутствие аневризмы церебральной артерии, но являются дорогостоящими и продолжительными по времени. В случае обнаружения аневризмы ее геометрия может быть определена с помощью сегментирования исходных DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) данных. Для определения кровотока в пораженной церебральной артерии может использоваться доплер УЗИ.

Индивидуальная модель церебральной артерии с аневризмой. Для проведения модельных исследований и оценки предоперационной гемодинамики использована индивидуальная геометрическая модель церебральной артерии пациента с аневризмой. Форма исследуемой церебральной артерии представлена на рис. 1, а. В области слияния позвоночных артерий наблюдается гигантская веретенообразная аневризма, расположенная вдоль базилярной артерии. Длина аневризмы составляет 35 мм, максимальный диаметр – 27 мм. Прогнозирование и оценка риска разрыва такой аневризмы только клиническими методами крайне затруднительна ввиду ее большого размера и сложной формы.

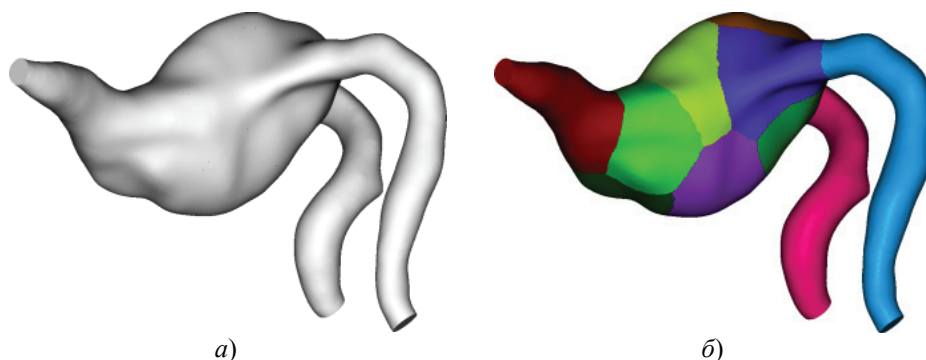


Рис. 1. Базилярная артерия с веретенообразной аневризмой (а); пример разбиения геометрической модели церебральной артерии с аневризмой на расчетные подобласти (б)

Помимо морфологических параметров врачу необходимо также оценить гемодинамические параметры в области аневризмы и в первую очередь гемодинамическую нагрузку на стенки церебральной артерии.

Математическое моделирование гемодинамики церебральной артерии. Для определения гемодинамических параметров в области церебральной аневризмы и гемодинамической нагрузки на стенки аневризмы в работе используется метод математического моделирования гемодинамики. За основу математической модели гемодинамики сердечно-сосудистой системы взята разработанная и протестированная ее многомасштабная модель [4, 5], включающая модели глобальной гемодинамики, гемодинамики артериального русла и локальной гемодинамики церебральной артерии. В отличие от исходной многомасштабной модели сердечно-сосудистой системы для учета индивидуальных реологических свойств крови пациента многомасштабная модель дополнена оригинальной моделью локальной вязкости, которая позволяет учесть индивидуальную зависимость вязкости крови пациента от степени сдвига.

Для ускорения расчета модифицированной модели гемодинамики был разработан и реализован алгоритм параллельного решения уравнений с помощью технологии высокопроизводительных вычислений MPI (Message Passing Interface). Алгоритм основан на разбиении исходной вычислительной области на относительно равные вычислительные подобласти, каждая из которых обрабатывается отдельным вычислительным процессом. Разбиение на подобласти зависит от наличия доступных вычислительных ресурсов и производится так, чтобы обмен данными между вычислительными процессами во время выполнения расчета был минимальным. Пример разбиения геометрической модели на подобласти представлен на рис. 1, б.

Реологические свойства крови пациента. Для учета индивидуальных особенностей конкретного пациента происходит индивидуализация математической модели сердечно-сосудистой системы с использованием индивидуальных реологических данных крови пациента. Имеется возможность представления крови на основе экспериментальных данных в виде ньютоновской (с постоянной вязкостью) или неньютоновской жидкости. Измерение реологических свойств крови пациента должно происходить при различных скоростях сдвига и может осуществляться, например, ротационным вискозиметром Haake RV/CV100 (Haake, Германия).

Для представления нелинейной зависимости между вязкостью крови и степенью сдвига могут использоваться как классические модели, например степенной закон вязкости, модель Кассона и др., так и предложенная авторами модель локальной вязкости. В отличие от классических моделей модель локальной вязкости основана на множестве кубических сплайнов, которые точно интерполируют полученную экспериментальную кривую измерений вязкости крови. В классических же моделях форма интерполирующей кривой задана заранее, что приводит к расхождению модельной и экспериментальной кривых в отдельных областях измерений, и далее к неточности определения гемодинамических характеристик в области церебральной аневризмы. Измеренная зависимость вязкости крови пациента от степени сдвига приведена на рис. 2. Как видно из рисунка неньютоновские свойства крови особенно сильно проявляются в областях скорости сдвига $0 \dots 100 \text{ с}^{-1}$, где кривая вязкости существенно возрастает.

Результаты. Используя предложенные методы и подходы, разработана система поддержки принятия решений врача при оценке предоперационного состояния больных с острыми нарушениями кровообращения. Система построена на основе модульной архитектуры и включает в себя следующие модули: ввода данных о пациенте; ввода данных о церебральной артерии; ввода реологических свойств крови; индивидуализации математической модели сердечно-сосудистой системы

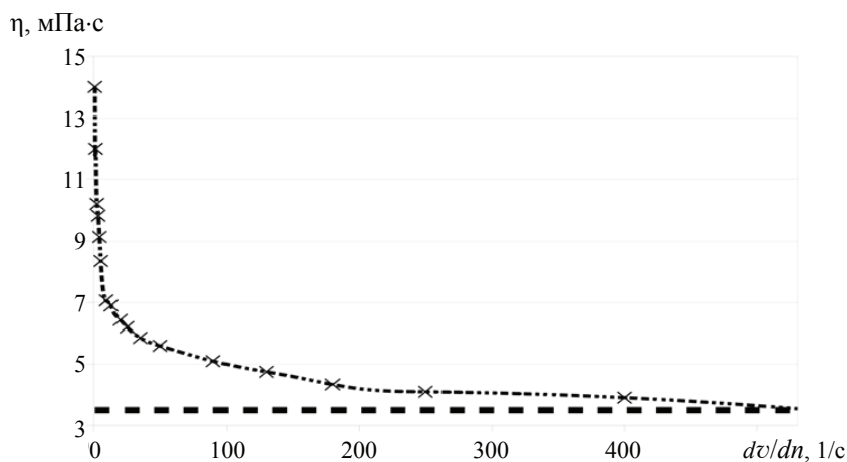


Рис. 2. Экспериментальная зависимость вязкости крови пациента η от степени сдвига $\dot{\gamma}$:

× кровь; — — — ньютоновская и неньютоновская жидкости

пациента; расчета уравнений многомасштабной модели сердечно-сосудистой системы пациента; первичной обработки результатов расчета; визуализации данных расчета; оценки предоперационного состояния церебральной гемодинамики пациента. Схема разработанной системы поддержки принятия решений врача представлена на рис. 3.

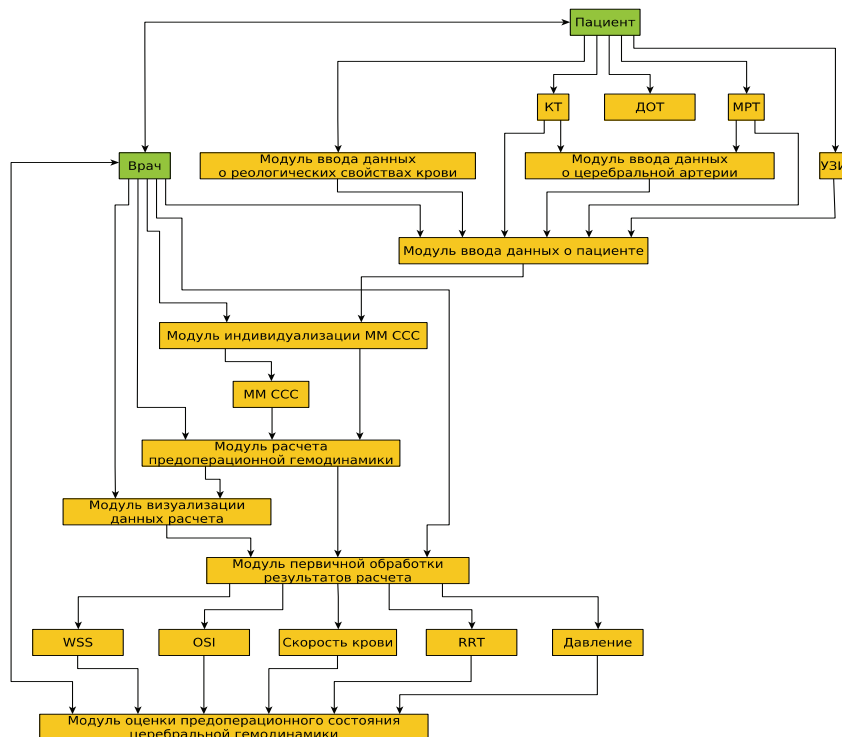


Рис. 3. Схема системы поддержки принятия решений для оценки предоперационного состояния церебральной гемодинамики

На основе количественных показателей, характеризующих церебральную гемодинамику пациента, врачом принимается решение о проведении необходимой лечебной процедуры для нормализации мозгового кровообращения пациента. Метод диффузионной оптической томографии планируется использовать в качестве дополнительного метода диагностики данных патологий. Группа пациентов проходит быстрые и относительно дешевые скрининговые обследования, у небольшого числа пациентов выявляются отклонения от нормы и они направляются на дополнительное обследование с помощью более точных методов медицинской визуализации. Затем по итогам серии диагностических исследований врач ставит конкретный диагноз.

На рисунке 4 представлена EER-модель (Enhanced Entity-Relationship) базы данных, используемой в разработанной СППР. Данная модель содержит следующие сущности: симуляцию (Simulation); пациента (Patient); параметры сердечно-сосудистой системы (CVS-Parameters); параметры сосудистой системы (Circulation_parameters); сердце (Heart); желудочек (Ventricle); клапан (Valve); глобальную гемодинамику (Global_hemodynamics); артерию (Artery); параметры артериального русла (Arterial_tree_parameters); гемодинамику артериального русла (Arterial_treehemodynamics); 1D – 3D; параметры церебральной артерии (Cerebral_arteryparameters); локальную гемодинамику церебральной артерии (Local_hemodynamics_of_cerebralartery).

Разработанная СППР использована для анализа влияния неньютоновских свойств крови пациента и патологических факторов глобальной гемодинамики на распределение гемодинамических характеристик церебральной аневризмы. Основные анализируемые характеристики: распределение скорости крови, пристеночное напряжение сдвига (WSS – Wall Shear Stress), среднее значение WSS за сердечный цикл (AWSS – Average Wall Shear Stress), колебательный индекс сдвига (OSI – Oscillatory Shear Index), относительное время пребывания (RRT – Relative Residence Time).

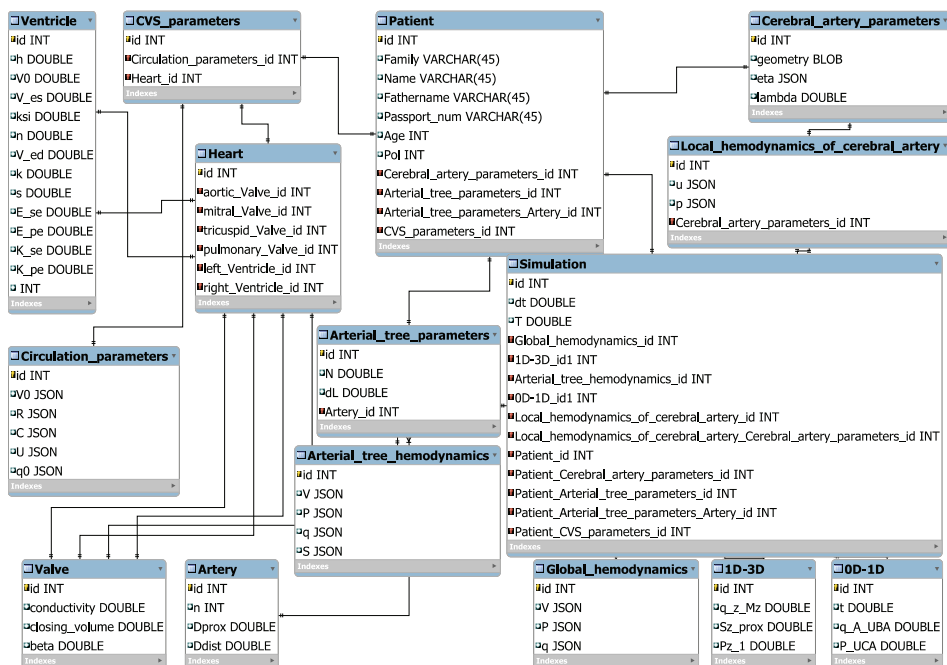


Рис. 4. Enhanced Entity-Relationship диаграмма базы данных (EER-диаграмма), используемой в СППР для оценки предоперационного состояния гемодинамики больных с церебральной аневризмой

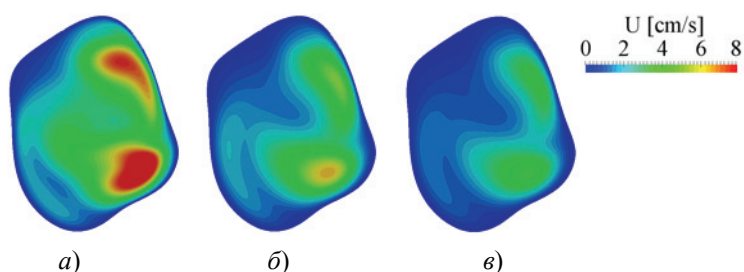


Рис. 5. Распределение скорости крови в центральном сечении аневризмы при использовании ньютоновской (а), неньютоновской (б) жидкости и недостаточности митрального клапана (в)

Геометрическая модель аневризмы получена на основе МРТ (см. рис. 1, а) Реологические свойства крови моделировались на основе результатов измерений (см. рис. 2). Патология общего кровообращения рассмотрена на примере недостаточности митрального клапана. Кривая входного кровотока определена с помощью доплер УЗИ.

В результате анализа выбранных гемодинамических характеристик обнаружено существенное влияние как неньютоновских свойств крови пациента, так и патологии глобальной гемодинамики на кровоток в церебральной аневризме. Пример распределения скорости крови в аневризме для различных вариантов моделирования приведен на рис. 5.

При использовании ньютоновской модели крови наблюдалась переоценка модуля скорости и производных характеристик (WSS, AWSS, OSI, RRT) по сравнению с неньютоновской моделью в среднем на 20...30 %. Влияние нарушений общей гемодинамики на кровоток в аневризме сравнительно меньше, порядка 10...15 %, ввиду наличия компенсаторных механизмов церебрального кровообращения. Разработанная СППР врача может применяться для многомасштабного моделирования сердечно-сосудистой системы для использования при индивидуальной оценке предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями мозгового кровообращения.

Заключение. Использование предложенной системы поддержки принятия решений врача на основе моделирования кровотока в церебральных артериях будет способствовать повышению точности оценки предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями мозгового кровообращения и снижению риска возможных осложнений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 17-41-680932.

Список литературы

1. Chung, B. Cfd for Evaluation and Treatment Planning of Aneurysms: Review of Proposed Clinical Uses and their Challenges / B. Chung, J. R. Cebra // Annals of Biomedical Engineering. – 2015. – Vol. 43, No. 1. – P. 122 – 138.
2. Синдеев С. В. Математическое моделирование гемодинамики в индивидуализированной модели церебральной аневризмы / С. В. Синдеев, С. В. Фролов, Я. Ш. Бауэр // Вестн. Там. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 424 – 428.
3. Математическое моделирование кровотока в области бифуркации базиллярной артерии / С. В. Фролов [и др.] // Вестн. Там. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 50 – 58.

4. Разработка модели многомасштабной гемодинамики для исследования основного кровообращения / С. В. Фролов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 4. – С. 46 – 53.

5. Синдеев, С. В. Моделирование гемодинамики сердечно-сосудистой системы при церебральной аневризме / С. В. Синдеев, С. В. Фролов // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 6. – С. 98 – 114.

Decision-Making Support System for Doctors to Assess the Preoperative State of Patients with Acute Brain Circulation Disorders

S. V. Sindeev, S. V. Frolov, A. Yu. Potlov

*Department of Biomedical Engineering,
TSTU, Tambov, Russia; sergej.frolov@gmail.com*

Keywords: aneurysm; hemodynamics; mathematical modeling of hydrodynamics; modular architecture; cerebral circulation.

Abstract: A clinical decision support system for assessing the preoperative hemodynamics of patients with acute cerebral disorders is proposed. The system is built on the basis of a modular architecture and can be integrated with medical information systems. Using a model example, the influence of the non-Newtonian blood properties and disorders of the general circulation on the blood flow in the cerebral aneurysm is evaluated.

References

1. Chung B., Cebral J.R. CFD for Evaluation and Treatment Planning of Aneurysms: Review of Proposed Clinical Uses and their Challenges, *Annals of Biomedical Engineering*, 2015, vol. 43, no. 1, pp. 122-138.

2. Sindeev S.V., Frolov S.V., Bauer J.S. [Mathematical modeling of hemodynamics in patient-specific model of cerebral aneurysm], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 424-428. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Frolov S.V., Sindeev S.V., Liepsch D., Balasso A. [Mathematical modeling of blood flow in basilar artery bifurcation region], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 50-58. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Frolov S.V., Sindeev S.V., Lischouk V.A., Gazizova D.Sh., Liepsch D., Balasso A. [Development of multiscale hemodynamics model for research of basilar artery circulation], *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*, 2013, no. 4, pp. 46-53. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Sindeev S.V., Frolov S.V. [Modeling the hemodynamics of the cardiovascular system in cerebral aneurysm], *Matematicheskoe modelirovanie* [Math modeling], 2016, vol. 28, no. 6, pp. 98-114. (In Russ.)

System der Entscheidungsunterstützung des Arztes bei der Beurteilung des präoperativen Zustandes des Patienten mit akuten Störungen des Gehirnblutkreislaufs

Zusammenfassung: Es ist ein System für Unterstützung der Entscheidungsfindung eines Arztes zur Beurteilung des präoperativen hämodynamischen Zustands des Patienten mit akuten Hirndurchblutungsstörungen

vorgeschlagen. Das System basiert auf einer modularen Architektur und kann in medizinische Informationssysteme integriert werden. Anhand eines Modellbeispiels ist der Einfluss von nicht-Newton'schen Bluteigenschaften und Verletzungen der allgemeinen Blutzirkulation auf den Blutfluss in dem zerebralen Aneurysma bestimmt.

Système du soutien des prises des décisions par un médecin lors de l'évaluation de l'état préopératoire des patients avec des troubles de la circulation cérébrale

Résumé: Est proposé un système du soutien par un médecin lors de l'évaluation de l'état préopératoire de l'hémodynamique des patients avec des troubles de la circulation cérébrale. Le système est basé sur une architecture modulaire et peut être intégré dans les systèmes informatiques médicaux. A la base de l'exemple de modèle est définie de l'influence des propriétés néonewtoniennes du sang et des troubles de la circulation sanguine générale dans un anévrisme cérébral.

Авторы: *Синдеев Сергей Вячеславович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Биомедицинская техника»; *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Потлов Антон Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
