

**Электронный периодический  
рецензируемый  
научный журнал**

**«SCI-ARTICLE.RU»**

<http://sci-article.ru>

**№144 (август) 2025**

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>РЕДКОЛЛЕГИЯ</b> .....	<b>3</b>
<b>ПОПОВА АЛИНА АЛЕКСАНДРОВНА. ПОЛИТИКА КОММЕМОРАЦИИ: ЗАКОН О РЕАБИЛИТАЦИИ ЖЕРТВ ПОЛИТИЧЕСКИХ РЕПРЕССИЙ</b> .....	<b>11</b>
<b>ВАСЮРИНА ДАРИЯ АНАТОЛЬЕВНА. ЭТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНЫМИ НЕЙРОСЕТЯМИ: ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЗЛУОПОТРЕБЛЕНИЙ В СОЗДАНИИ СИНТЕТИЧЕСКОГО КОНТЕНТА</b> .....	<b>19</b>
<b>БАШАБШЕХ МУРАД МАХМУД. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭПИДЕМИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ В БОЛЬШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЛАСТЯХ</b> .....	<b>23</b>
<b>ГОЛУБЕВ ВЛАДИМИР КОНСТАНТИНОВИЧ. ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОИМПУЛЬСНЫХ ЛИСТОВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	<b>38</b>
<b>МАНИН КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ХИМИИ И ФИЗИКИ: ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ «RELEON»</b> .....	<b>50</b>
<b>ЛАКОТКО ТАТЬЯНА ГЕОРГИЕВНА. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ НАРУШЕНИЯ И СОСТОЯНИЕ ВЕГЕТАТИВНОГО ТОНУСА У ПАЦИЕНТОВ С ПНЕВМОНИЕЙ</b> .....	<b>58</b>
<b>ЛОБАНОВ ИГОРЬ ЕВГЕНЬЕВИЧ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПО СЕКЦИЯМ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧЕ В ТРУБАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ПОТОКОВ С ЗАВИСИМОСТЬЮ ОТ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК</b> .....	<b>63</b>

## Редколлегия

**Агакишиева Тахмина Сулейман кызы.** Доктор философии, научный сотрудник Института Философии, Социологии и Права при Национальной Академии Наук Азербайджана, г.Баку.

**Агманова Атиркуль Егембердиевна.** Доктор филологических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной лингвистики Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (Республика Казахстан, г. Астана).

**Азизова Насиба Бахритдиновна.** Доктор философии по философским наукам, доцент, декан факультета Международных образовательных программ, Каршинский государственный университет (Узбекистан).

**Александрова Елена Геннадьевна.** Доктор филологических наук, преподаватель-методист Омского учебного центра ФПС.

**Ахмедова Разият Абдуллаевна.** Доктор филологических наук, профессор кафедры литературы народов Дагестана Дагестанского государственного университета.

**Барбанов Родион Евгеньевич.** Доктор философии психологии (PhD), доцент, с.н.с., преподаватель кафедры психологии и педагогики МАСИ, руководитель Лаборатории экопсихологии ИПИИЮ.

**Беззубко Лариса Владимировна.** Доктор наук по государственному управлению, кандидат экономических наук, профессор, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры.

**Бежанидзе Ирина Зурабовна.** Доктор химических наук, профессор департамента химии Батумского Государственного университета им. Шота Руставели.

**Бублик Николай Александрович.** Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Институт садоводства Национальной академии аграрных наук Украины, г. Киев.

**Галкин Александр Федорович.** Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор Национального минерально-сырьевого университета "Горный", г. Санкт-Петербург.

**Гафурова Дилфуза Анваровна.** Доктор химических наук, доцент, заведующая кафедрой, Национальный Университет Узбекистана.

**Головина Татьяна Александровна.** Доктор экономических наук, доцент кафедры "Экономика и менеджмент", ФГБОУ ВПО "Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс" г. Орел. Россия.

**Громов Владимир Геннадьевич.** Доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного, экологического права и криминологии ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского".

**Грошева Надежда Борисовна.** Доктор экономических наук, доцент, декан САФ БМБШ ИГУ.

**Дегтярь Андрей Олегович.** Доктор наук по государственному управлению, кандидат экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента и администрирования Харьковской государственной академии культуры.

**Еавстропов Владимир Михайлович.** Доктор медицинских наук, профессор кафедры безопасности технологических процессов и производств, Донской государственной технической университет.

**Жолдубаева Ажар Куанышбековна.** Доктор философских наук, профессор кафедры религиоведения и культурологии факультета философии и политологии Казахского Национального Университета имени аль-Фараби (Казахстан, Алматы).

**Жураев Даврон Аслонкулович.** Доктор философии по физико-математическим наукам, доцент, Высшее военное авиационное училище республики Узбекистан.

**Зейналов Гусейн Гардаш оглы.** Доктор философских наук, профессор кафедры философии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный педагогический институт имени М.Е. Евсевьева».

**Зинченко Виктор Викторович.** Доктор философских наук, профессор, главный научный сотрудник Института высшего образования Национальной академии педагогических наук Украины; профессор Института общества Киевского университета имени Б. Гринченко; профессор, заведующий кафедрой менеджмента Украинского гуманитарного института; руководитель Международной лаборатории образовательных технологий Центра гуманитарного образования Национальной академии наук Украины. Действительный член The Philosophical Pedagogy Association. Действительный член Towarzystwa Pedagogiki Filozoficznej im. Bronisława F.Trentowskiego.

**Зяблова Ольга Александровна.** Доктор филологических наук, профессор Дипломатической академии МИД России.

**Идиатуллоев Азат Корбангалиевич.** Доктор исторических наук, профессор кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО "УлГПУ им. И.Н. Ульянова".

**Калягин Алексей Николаевич.** Доктор медицинских наук, профессор. Заведующий кафедрой пропедевтики внутренних болезней ГБОУ ВПО "Иркутский государственный медицинский университет" Минздрава России, действительный член Академии энциклопедических наук, член-корреспондент Российской академии естествознания, Академии информатизации образования, Балтийской педагогической академии.

**Ковалева Светлана Викторовна.** Доктор философских наук, профессор кафедры истории и философии Костромского государственного технологического университета.

**Коваленко Елена Михайловна.** Доктор философских наук, профессор кафедры перевода и ИТЛ, Южный федеральный университет.

**Колесникова Галина Ивановна.** Доктор философских наук, доцент, член-корреспондент Российской академии естествознания, заслуженный деятель науки и образования, профессор кафедры Гуманитарных дисциплин Таганрожского института управления и экономики.

**Колесников Анатолий Сергеевич.** Доктор философских наук, профессор Института философии СПбГУ.

**Король Дмитрий Михайлович.** Доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой пропедевтики ортопедической стоматологии ВДНЗУ "Украинская медицинская стоматологическая академия".

**Кузьменко Игорь Николаевич.** Доктор философии в области математики и психологии. Генеральный директор ООО "РОСПРОРЫВ".

**Кучуков Магомед Мусаевич.** Доктор философских наук, профессор, заведующий кафедрой истории, философии и права Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им.В.М. Кокова.

**Лаврентьев Владимир Владимирович.** Доктор технических наук, доцент, академик РАЕ, МААНОИ, АПСН. Директор, заведующий кафедрой Горячеключевского филиала НОУ ВПО Московской академии предпринимательства при Правительстве Москвы.

**Лакота Елена Александровна.** Доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ "НИИСХ Юго-Востока", г. Саратов.

**Ланин Борис Александрович.** Доктор филологических наук, профессор, заведующий лабораторией ИСМО РАО.

**Лахтин Юрий Владимирович.** Доктор медицинских наук, доцент кафедры стоматологии и терапевтической стоматологии Харьковской медицинской академии последипломного образования.

**Лобанов Игорь Евгеньевич.** Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Московский авиационный институт.

**Лучинкина Анжелика Ильинична.** Доктор психологических наук, зав. кафедрой психологии Республиканского высшего учебного заведения "Крымский инженерно-педагогический университет".

**Луценко Евгений Вениаминович.** Доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры компьютерных технологий и систем ФГБОУ ВО "Кубанский ГАУ им.И.Т.Трубилина", г. Краснодар.

**Манцава Майя Михайловна.** Доктор медицинских наук, профессор, президент Международного Общества Реологов.

**Марков Андрей Кириллович.** Доктор экономических наук, ВНИИ фитопатологии, руководитель направления.

**Маслихин Александр Витальевич.** Доктор философских наук, профессор. Правительство Республики Марий Эл.

**Мирзаев Номаз Мирзаевич.** Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий (НИЦ ИКТ) при Ташкентском университете информационных технологий им. Мухаммада Аль-Хоразмий.

**Можаев Евгений Евгеньевич.** Доктор экономических наук, профессор, директор по научным и образовательным программам Национального агентства по энергосбережению и возобновляемым источникам энергии.

**Моторина Валентина Григорьевна.** Доктор педагогических наук, профессор, зав. кафедрой математики Харьковского национального педагогического университета им. Г.С. Сковороды.

**Набиев Алпаша Алибек.** Доктор наук по геоинформатике, старший преподаватель, географический факультет, кафедра физической географии, Бакинский государственный университет.

**Надькин Тимофей Дмитриевич.** Профессор кафедры отечественной истории и этнологии ФГБОУ ВПО "Мордовский государственный педагогический институт имени М. Е. Евсевьева", доктор исторических наук, доцент (Республика Мордовия, г. Саранск).

**Наумов Владимир Аркадьевич.** Заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования Калининградского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор, кандидат физико-математических наук, член Российской инженерной академии, Российской академии естественных наук.

**Огарок Андрей Леонтиевич.** Доктор технических наук, старший научный сотрудник, преподаватель РТУ МИРЭА - Российский технологический университет, преподаватель аспирантуры ФГАНУ "Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти (ЦИТиС)".

**Орехов Владимир Иванович.** Доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики инноваций ООО "Центр помощи профессиональным организациям".

**Ощепкова Юлия Игоревна.** Доктор химических наук, заведующий лабораторией ХБиП Института биоорганической химии АН РУз.

**Пащенко Владимир Филимонович.** Доктор технических наук, профессор, кафедра "Оптимізація технологічних систем імені Т.П. Євсюкова", ХНТУСГ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МЕХАНОТРОНІКИ І СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТУ.

**Пелецкис Кястутис Чесловович.** Доктор социальных наук, профессор экономики Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса.

**Петров Владислав Олегович.** Доктор искусствоведения, доцент ВАК, доцент кафедры теории и истории музыки Астраханской государственной консерватории, член-корреспондент РАЕ.

**Походенько-Чудакова Ирина Олеговна.** Доктор медицинских наук, профессор. Заведующий кафедрой хирургической стоматологии УО «Белорусский государственный медицинский университет».

**Предеус Наталия Владимировна.** Доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры Саратовского социально-экономического института (филиала) РЭУ им. Г.В. Плеханова.

**Пятаева Ольга Алексеевна.** Доктор экономических наук, доцент, заместитель директора Центра коммерциализации разработок и трансфера технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

**Розыходжаева Гульнора Ахмедовна.** Доктор медицинских наук, руководитель клиничко-диагностического отдела Центральной клинической больницы №1 Медико-санитарного объединения; доцент кафедры ультразвуковой диагностики Ташкентского института повышения квалификации врачей; член Европейской ассоциации кардиоваскулярной профилактики и реабилитации (EACPR), Европейского общества радиологии (ESR), член Европейского общества атеросклероза (EAS), член рабочих групп атеросклероза и сосудистой биологии („Atherosclerosis and Vascular Biology“), периферического кровообращения („Peripheral Circulation“), электронной кардиологии (e-cardiology) и сердечной недостаточности Европейского общества кардиологии (ESC), Ассоциации «Российский доплеровский клуб», Deutsche HerzStiftung.

**Сорокопудов Владимир Николаевич.** Доктор сельскохозяйственных наук, профессор. ФГАОУ ВПО "Белгородский государственный национальный исследовательский университет".

**Супрун Элина Владиславовна.** Доктор медицинских наук, профессор кафедры общей фармации и безопасности лекарств Национального фармацевтического университета, г.Харьков, Украина.

**Терецкий Владислав Иванович.** Доктор юридических наук, профессор кафедры гражданского права и процесса Харьковского национального университета внутренних дел.

**Трошин Александр Сергеевич.** Доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой менеджмента и внешнеэкономической деятельности, ФГБОУ ВО "Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова".

**Феофанов Александр Николаевич.** Доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН".

**Хамраева Сайёра Насимовна.** Доктор экономических наук, доцент кафедры экономика, Каршинский инженерно-экономический институт, Узбекистан.

**Худойкулов Тулкин Дустобоевич.** Доктор исторических наук, проректор по учебным делам, Шахрисабзский Государственный Педагогический Институт (Узбекистан).

**Чернова Ольга Анатольевна.** Доктор экономических наук, зав.кафедрой финансов и бухучета Южного федерального университета (филиал в г.Новошахтинске).

**Шедько Юрий Николаевич.** Доктор экономических наук, профессор кафедры государственного и муниципального управления Финансового университета при Правительстве Российской Федерации.

**Шелухин Николай Леонидович.** Доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой права и публичного администрирования Мариупольского государственного университета, г. Мариуполь, Украина.

**Шихнебиев Даир Абдулкеримович.** Доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии №3 ГБОУ ВПО "Дагестанская государственная медицинская академия".

**Эшкурбонов Фуркат Бозорович.** Доктор химических наук, заведующий кафедрой Промышленных технологий Термезского государственного университета (Узбекистан).

**Яковенко Наталия Владимировна.** Доктор географических наук, профессор, профессор кафедры социально-экономической географии и регионоведения ФГБОУ ВПО "ВГУ".

**Абдуллаев Ахмед Маллаевич.** Кандидат физико-математических наук, профессор Ташкентского университета информационных технологий.

**Акпамбетова Камшат Макпалбаевна.** Кандидат географических наук, доцент Карагандинского государственного университета (Республика Казахстан).

**Ашмаров Игорь Анатольевич.** Кандидат экономических наук, доцент кафедры гуманитарных и социально-экономических дисциплин, Воронежский государственный институт искусств, профессор РАЕ.

**Ашрапов Улугбек Товфикович.** Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

**Бай Татьяна Владимировна.** Кандидат педагогических наук, доцент ФГБОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет).

**Бектурова Жанат Базарбаевна.** Кандидат филологических наук, доцент Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева (Республика Казахстан, г.Астана).

**Беляева Наталия Владимировна.** Кандидат филологических наук, доцент кафедры русского языка, литературы и методики преподавания Школы педагогики Дальневосточного федерального университета.

**Бозоров Бахритдин Махаммадиевич.** Кандидат биологических наук, доцент, зав.кафедрой "Физиология, генетика и биохимии" Самаркандского государственного университета Узбекистан.

**Бойко Наталья Николаевна.** Кандидат юридических наук, доцент. Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО "БашГУ".

**Боровой Евгений Михайлович.** Кандидат философских наук, доцент, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (г. Новосибирск).

**Васильев Денис Владимирович.** Кандидат биологических наук, профессор, ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (г. Обнинск).

**Вицентий Александр Владимирович.** Кандидат технических наук, научный сотрудник, доцент кафедры информационных систем и технологий, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского НЦ РАН, Кольский филиал ПетрГУ.

**Гайдученко Юрий Сергеевич.** Кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры анатомии, гистологии, физиологии и патологической анатомии ФГБОУ ВПО "Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина".

**Гресь Сергей Михайлович.** Кандидат исторических наук, доцент, Учреждение образования "Гродненский государственный медицинский университет", Республика Беларусь.

**Джумагалиева Куляш Валитхановна.** Кандидат исторических наук, доцент Казахской инженерно-технической академии, г.Астана, профессор Российской академии естествознания.

**Егорова Олеся Ивановна.** Кандидат филологических наук, старший преподаватель кафедры теории и практики перевода Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина).

**Ермакова Елена Владимировна.** Кандидат педагогических наук, доцент, Ишимский государственный педагогический институт.

**Жерновникова Оксана Анатольевна.** Кандидат педагогических наук, доцент, Харьковский национальный педагогический университет имени Г.С. Сковороды.

**Жохова Елена Владимировна.** Кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры фармакогнозии Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Профессионального Образования "Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия".

**Закирова Оксана Вячеславовна.** Кандидат филологических наук, доцент кафедры русского языка и контрастивного языкознания Елабужского института Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Ивашина Татьяна Михайловна.** Кандидат филологических наук, доцент кафедры германской филологии Киевского Международного университета (Киев, Украина).

**Искендерова Сабир Джафар кызы.** Кандидат философских наук, старший научный сотрудник Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку. Институт Философии, Социологии и Права.

**Карякин Дмитрий Владимирович.** Кандидат технических наук, специальность 05.12.13 - системы, сети и устройства телекоммуникаций. Старший системный инженер компании Juniper Networks.

**Катков Юрий Николаевич.** Кандидат экономических наук, доцент кафедры бухгалтерского учета и налогообложения Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского.

**Кебалова Любовь Александровна.** Кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры геоэкологии и устойчивого развития Северо-Осетинского государственного университета имени К.Л. Хетагурова (Владикавказ).

**Климук Владимир Владимирович.** Кандидат экономических наук, ассоциированный профессор Региональной Академии менеджмента. Начальник учебно-методического отдела, доцент кафедры экономики и организации производства, Учреждение образования "Барановичский государственный университет".

**Кобланов Жоламан Таубаевич.** Ассоциированный профессор, кандидат филологических наук. Профессор кафедры казахского языка и литературы Каспийского государственного университета технологии и инжиниринга имени Шахмардана Есенова.

**Ковбан Андрей Владимирович.** Кандидат юридических наук, доцент кафедры административного и уголовного права, Одесская национальная морская академия, Украина.

**Кольцова Ирина Владимировна.** Кандидат психологических наук, старший преподаватель кафедры психологии, ГБОУ ВО "Ставропольский государственный педагогический институт" (г. Ставрополь).

**Короткова Надежда Владимировна.** Кандидат педагогических наук, доцент кафедры русского языка ФГБОУ ВПО "Липецкий государственный педагогический институт".

**Кузнецова Ирина Павловна.** Кандидат социологических наук. Докторант Санкт-Петербургского Университета, социологического факультета, член Российского общества социологов - РОС, член Европейской Социологической Ассоциации -ESA.

**Кузьмина Татьяна Ивановна.** Кандидат психологических наук, доцент кафедры общей психологии ГБОУ ВПО "Московский городской психолого-педагогический университет", доцент кафедры специальной психологии и коррекционной педагогики НОУ ВПО "Московский психолого-социальный университет", член Международного общества по изучению развития поведения (ISSBD).

**Левкин Григорий Григорьевич.** Кандидат ветеринарных наук, доцент ФГБОУ ВПО "Омский государственный университет путей сообщения".

**Лушников Александр Александрович.** Кандидат исторических наук, член Международной Ассоциации славянских, восточноевропейских и евразийских исследований. Место работы: Центр технологического обучения г.Пензы, методист.

**Мелкадзе Нанули Самсоновна.** Кандидат филологических наук, доцент, преподаватель департамента славистики Кутаисского государственного университета.

**Назарова Ольга Петровна.** Кандидат технических наук, доцент кафедры Высшей математики и физики Таврического государственного агротехнологического университета (г. Мелитополь, Украина).

**Назмутдинов Ризабек Агзамович.** Кандидат психологических наук, доцент кафедры психологии, Костанайский государственный педагогический институт.

**Насимов Мурат Орленбаевич.** Кандидат политических наук. Проректор по воспитательной работе и международным связям университета "Болашак".

**Непомнящая Наталья Васильевна.** Кандидат экономических наук, доцент кафедры бухгалтерского учета и статистики, Сибирский федеральный университет.

- Олейник Татьяна Алексеевна.** Кандидат педагогических наук, доцент, профессор кафедры ИТ Харьковского национального педагогического университета имени Г.С.Сковороды.
- Орехова Татьяна Романовна.** Кандидат экономических наук, заведующий кафедрой управления инновациями в реальном секторе экономики ООО "Центр помощи профессиональным организациям".
- Остапенко Ольга Валериевна.** Кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры гистологии и эмбриологии Национального медицинского университета имени А.А. Богомольца (Киев, Украина).
- Поляков Евгений Михайлович.** Кандидат политических наук, преподаватель кафедры социологии и политологии ВГУ (Воронеж); Научный сотрудник (стажер-исследователь) Института перспективных гуманитарных исследований и технологий при МГГУ (Москва).
- Попова Юлия Михайловна.** Кандидат экономических наук, доцент кафедры международной экономики и маркетинга Полтавского национального технического университета им. Ю. Кондратюка.
- Рамазанов Сайгим Манапович.** Кандидат экономических наук, профессор, главный эксперт ОАО «РусГидро», ведущий научный сотрудник, член-корреспондент Российской академии естественных наук.
- Рибцун Юлия Валентиновна.** Кандидат педагогических наук, старший научный сотрудник лаборатории логопедии Института специальной педагогики Национальной академии педагогических наук Украины.
- Сазонов Сергей Юрьевич.** Кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных систем и технологий ФГБОУ ВПО "Юго-Западный государственный университет".
- Саметова Фаузия Толеушайховна.** Кандидат филологических наук, профессор, проректор по воспитательной работе Академии Кайнар (Республика Казахстан, город Алматы).
- Сафронов Николай Степанович.** Кандидат экономических наук, действительный член РАЕН, заместитель Председателя отделения "Ресурсосбережение и возобновляемая энергетика". Генеральный директор Национального агентства по энергосбережению и возобновляемым источникам энергии, заместитель Председателя Подкомитета по энергоэффективности и возобновляемой энергетике Комитета по энергетической политике и энергоэффективности Российского союза промышленников и предпринимателей, сопредседатель Международной конфедерации неправительственных организаций с области ресурсосбережения, возобновляемой энергетике и устойчивого развития, ведущий научный сотрудник.
- Серета Евгения Витальевна.** Кандидат филологических наук, старший преподаватель Военной Академии МО РФ.
- Слизкова Елена Владимировна.** Кандидат педагогических наук, доцент кафедры социальной педагогики и педагогики детства ФГБОУ ВПО "Ишимский государственный педагогический институт им. П.П. Ершова".
- Смирнова Юлия Георгиевна.** Кандидат педагогических наук, ассоциированный профессор (доцент) Алматинского университета энергетики и связи.
- Франчук Татьяна Иосифовна.** Кандидат педагогических наук, доцент, Каменец-Подольский национальный университет имени Ивана Огиенка.
- Церцвадзе Мзия Гилаевна.** Кандидат филологических наук, профессор, Государственный университет им. А. Церетели (Грузия, Кутаиси).
- Чернышова Эльвира Петровна.** Кандидат философских наук, доцент кафедры искусствоведения и педагогики искусства института художественного образования, ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена», г. Санкт-Петербург.
- Шамутдинов Айдар Харисович.** Кандидат технических наук, доцент кафедры Омского автобронетанкового инженерного института.

**Шангина Елена Игоревна.** Кандидат технических наук, доктор педагогических наук, профессор, Зав. кафедрой Уральского государственного горного университета.

**Шапауов Алиби Кабыкенович.** Кандидат филологических наук, профессор. Казахстан. г.Кокшетау. Кокшетауский государственный университет имени Ш. Уалиханова.

**Шаргородская Наталья Леонидовна.** Кандидат наук по госуправлению, помощник заместителя председателя Одесского областного совета.

**Шафиров Валерий Геннадьевич.** Кандидат юридических наук, профессор кафедры Аграрных отношений и кадрового обеспечения АПК, Врио ректора ФГБОУ ДПО «Российская академия кадрового обеспечения агропромышленного комплекса».

**Шошин Сергей Владимирович.** Кандидат юридических наук, доцент кафедры уголовного, экологического права и криминологии юридического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

**Яковлев Владимир Вячеславович.** Кандидат педагогических наук, профессор Российской Академии Естествознания, почетный доктор наук (DOCTOR OF SCIENCE, HONORIS CAUSA).

# ЮРИСПРУДЕНЦИЯ

## ПОЛИТИКА КОММЕМОРАЦИИ: ЗАКОН О РЕАБИЛИТАЦИИ ЖЕРТВ ПОЛИТИЧЕСКИХ РЕПРЕССИЙ

*Попова Алина Александровна*

Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина  
Студент

*Бойкова Татьяна Юрьевна, кандидат исторических наук, доцент кафедры  
гражданского и международного частного права юридического факультета,  
Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина*

**Ключевые слова:** репрессии; Россия; СССР; демократизация; коммеморация

**Keywords:** repressions; Russia; USSR; democratization; commemoration

**Аннотация:** Нарушения прав человека в XX веке, связанные с неприятием гражданами общегосударственной идеологии, осуществлялись в условиях параллельного очерчивания рамок их незыблемости. В конце XX века, когда тоталитарные режимы пали, встала необходимость обозначения неправомерности действий предшествующей власти, для чего во многих странах были приняты законы «о реабилитации жертв политических репрессий» в разнообразии их наименований. Проработка памяти общества в отношении событий прошлого, то есть коммеморация, стала частью политики многих государств. Данная статья анализирует эволюцию законодательства о реабилитации жертв политических репрессий в СССР и России, а также выявляет необходимость дальнейшей коммеморации.

**Abstract:** Violations of human rights in the 20th century, associated with citizens' non-acceptance of the national ideology, were carried out in conditions of parallel delineation of the framework of their inviolability. At the end of the 20th century, when totalitarian regimes fell, it became necessary to indicate the illegality of the actions of the previous government, for which many countries have adopted laws "on the rehabilitation of victims of political repression" in a variety of their names. Studying the memory of society in relation to past events, that is, commemoration, has become part of the policy of many states. This article analyzes the evolution of legislation on the rehabilitation of victims of political repression in the USSR and Russia, and also identifies the need for further commemoration.

**УДК 34**

**Введение:**

XX век охарактеризовал себя несколькими волнами демократизации: ключевая «длинная» волна, начавшаяся в XIX веке, дала паттерн демократического поведения и кристаллизовала демократические институты как структуры массового политического участия. Вторая «обратная» волна демократизации, периодом которой были 1960-1975 годы, когда бушевала холодная волна, была построена на

поляризации двух систем: коммунистической и капиталистической. Данное время характеризуется доминированием паттерна закрытых недемократических институтов, отсутствием гласности, институтов выборности, наличием высокого уровня репрессивности и т.д. Третья волна демократизации (с 1975 года по настоящее время) выдвинула на передний план права и свободы человека и гражданина, а также имела своей целью восстановить нарушенные ранее права [11]. Поскольку нацеленность на проработку прошлого после падения диктатур стала основой посткоммунистических стран, коммеморация стала важной составляющей политической стратегии, осуществлявшейся будь то в форме государственного раскрытия засекреченных ранее архивов и принятия актов о незаконности прежнего режима или в форме диалога граждан между собой, политических акций, гражданских инициатив.

### **Актуальность:**

Политика коммеморации продолжает оставаться важной частью правового и исторического переосмысления прошлого, сопровождающая каждую страну, пережившую травмирующие события. Россия не стала исключением, начав реабилитацию жертв политических репрессий в середине XX века. Является актуальной необходимость рассмотрения попыток реабилитации жертв политических репрессий для общего понимания того, какие действия предпринимались властями, чтобы закрепить память о прошлом для недопущения подобного в будущем.

### **Цели:**

Цель исследования состоит в правовом анализе нормативного регулирования и правоприменительной практики в сфере реабилитации жертв политических репрессий в Российской Федерации и политики коммеморации.

### **Задачи:**

1. Изучить законодательство о реабилитации жертв политических репрессий в советское время;
2. Изучить законодательство о реабилитации жертв политических репрессий в Российской Федерации;
3. Сделать выводы об институциональных проблемах, затрудняющих реализацию политики коммеморации в России, а также о развитии такой политики.

### **Научная новизна:**

Научная новизна заключается в рассмотрении законодательства о реабилитации жертв политических репрессий через историческую призму, рассмотрении закрепления коммеморальных практик, начиная с Советского Союза, а также анализ сегодняшнего закона о реабилитации жертв политических репрессий.

Первый этап реабилитации политических заключенных в СССР начался 4 мая 1954 года, практически через год после смерти И.В.Сталина, с Постановления Президиума ЦК КПСС «О создании центральной комиссии и местных комиссий по пересмотру дел осужденных за «контрреволюционные преступления», содержащихся в лагерях, колониях, тюрьмах и находящихся в ссылке на поселении» [7]. Комиссии имели право отменить решения по делу, полностью реабилитировать осужденного,

переквалифицировать состав преступления, сократить срок наказания и прочее. Это был первый шаг к политике реабилитации политических заключенных и осуждения политических репрессий, при условии, что ранее эта тема на таком уровне даже не поднималась.

Более мощный рывок в процессе реабилитации начался после XX съезда КПСС, когда Хрущев выступил со своим докладом, осуждающим культ личности Сталина. «Массовые аресты партийных, советских, хозяйственных, военных работников нанесли огромный ущерб нашей стране, делу социалистического строительства», – говорил он в своей речи [6].

Но даже несмотря на общий нарратив направленности на осуждение культа личности Сталина и массовую реабилитацию, о масштабах сего события можно говорить в ограниченном порядке, поскольку реабилитация затрагивала только сталинские времена, при этом прочно проигнорировав 20-е годы, поскольку Партия не желала дискредитировать себя, основу власти, коммунистический строй. Этим объяснялся и отказ в рассмотрении самых известных публичных процессов таких как «Шахтинское дело» или «Большие московские процессы» и др. [12].

24 марта 1956 г. был издан Указ Президиума Верховного Совета СССР «О рассмотрении дел на лиц, отбывающих наказание за политические, должностные и хозяйственные преступления» [5]. В соответствии с данным Указом образовывались комиссии Президиума Верховного Совета СССР, которые проверяли обоснованность осуждения лиц, обвиненного в политическом преступлении, в местах лишения свободы, а также целесообразность нахождения в заключении лиц, совершивших политические, хозяйственные или должностные преступления, но, по сути, не представляющих никакой общественной или государственной опасности.

Все эти хрущевские реформы по реабилитации были половинчатыми, неполноценными поскольку не затрагивали времена до середины 30-х годов, ведь главным обвиняемым был Сталин, а также дела рассматривались в ограниченном порядке, преимущественно те, которые можно было рассмотреть без репутационного ущерба партии.

Но даже несмотря на то, что этот шаг был лишь способом поднять свой политический имидж в глазах населения, это открыло данную тему, скинуло некоторые оковы цензуры и людям дали право говорить о репрессиях. В период по 1987 год процесс реабилитации шел, но шел медленными темпами, все так же в заявительном порядке, и массовости не имел.

Времена Перестройки возобновили уже затухший на тот момент процесс реабилитации. Направленность на гласность возбудили разговоры о необходимости реабилитации политических репрессированных, и этот процесс было уже не остановить.

28 сентября 1987 г. Политбюро ЦК КПСС создало специальную Комиссию по дополнительному изучению материалов, связанных с репрессиями, имевшими место в период 1930–1940-х и начала 1950-х гг. 25 декабря 1988 года в официальной Записке Комиссия подвела итоги изучения материалов. В записке говорилось снова о личной роли Сталина и его непосредственного окружения, в том числе Молотова, Кагановича, Берии, Ворошилова, Жданова, Маленкова, Микояна, Хрущева,

Булганина, Андреева, С. Косиора, Сулова за репрессии и беззаконие. Примечательно, что в Записке говорилось, что «**впервые** массовые репрессии были осуществлены в начале 30-х годов». То есть политические преследования до 30-х годов репрессиями не считались и не учитывались при изучении материалов. Записка заканчивалась словами: «Вопросы восстановления справедливости приобрели сейчас исключительное политическое значение. Полной реабилитации невинно пострадавших, увековечения их памяти ждут общественность, их родственники и близкие. Такие меры способствовали бы практическому утверждению в повседневной жизни гуманистических норм и идеалов, укрепили бы авторитет и престиж СССР в мире». Комиссия по результатам своей деятельности рассматривает множество дел и публикуют отчеты о своей работе [8].

16 января 1989 года издается Указ Президиума Верховного Совета СССР «О дополнительных мерах по восстановлению справедливости в отношении жертв репрессий, имевших место в период 30–40-х и начала 50-х годов» [3]. Данным Указом отменялись внесудебные решения, которые были вынесены в 30-40-е годы, а также в начале 50-х годов, действовавшими тогда «тройками» НКВД УНКВД, коллегиями ОГПУ и «особыми совещаниями» НКВД - МГБ - МВД СССР, не отмененные к моменту издания Указа. Граждане, репрессированные решениями этих органов, считались реабилитированными. С этого Указа, можно сказать, юридически началась политика коммеморации и увековечивания памяти жертв политических репрессий, так как Местным Советам народных депутатов вместе с общественными организациями приказывалось обеспечить оказание помощи реабилитированным в реализации их прав, а также в создании памятников жертв репрессий и их содержании в надлежащем порядке. «Указ стал мощнейшим толчком в реабилитационном процессе. Меньше, чем за год, к началу 1990 г., было реабилитировано 838 630 человек» [9].

13 августа 1990 года Горбачев официально выпустил Указ «О восстановлении прав всех жертв политических репрессий 20-х-50-х годов» [4]. В Указе осуждались «массовые репрессии, произвол и беззаконие, которые совершались сталинским руководством от имени революции, партии, народа». Интерес представляет тот факт, что границы снизились уже до 20-х годов, хотя верхняя граница все же оставалась на уровне 50-х годов. В Указе репрессии назывались «политическими преступлениями на почве злоупотребления властью». Признавались незаконными репрессии в отношении крестьян во время коллективизации, а также в отношении других граждан по «политическим, социальным, национальным, религиозным и иным мотивам в 1920-1950-х годах, права которых должны быть полностью восстановлены». Политические преследования в этом Указе также были названы «несовместимыми с нормами цивилизации» и Конституцией. Горбачев говорил о лишении советского народа свобод, «которые в демократическом обществе считаются естественными и неотъемлемыми», о том, что не только во внесудебных органах, но и в судах попирались элементарные нормы судопроизводства». Уже официально и в юридически-закрепленном формате зазвучали интенции о том, что репрессии несовместимы с государственной политикой СССР.

18 октября 1991 года Президентом РСФСР Б.Н.Ельциным был подписан Закон Российской Федерации «О реабилитации жертв политических репрессий» [1]. Этот закон имел значение не столько в качестве основания для предоставления льгот и выплат пострадавшим, сколько официально заявлял о преступности предыдущего режима и одновременно с этим демонстрировал, что новое государство признает

свою ответственность за деяния, совершенные предыдущей властью. Закон начинается со слов: «За годы Советской власти миллионы людей стали жертвами произвола тоталитарного государства, подверглись репрессиям за политические и религиозные убеждения, по социальным, национальным и иным признакам. Верховный Совет РСФСР [Федеральное Собрание Российской Федерации] выражает глубокое сочувствие жертвам необоснованных репрессий, их родным и близким, заявляет о неуклонном стремлении добиваться реальных гарантий обеспечения законности и прав человека». Признание ошибок прошлого и стремление исправить эти ошибки – основное значение принятия подобных законов. Как отмечал судья Конституционного Суда РФ К.В. Арановский в своем особом мнении к Постановлению Конституционного Суда РФ от 10.12.2019 N 39-П [2]: «Российская Федерация не продолжает собою в праве, а заменяет на своей территории государство, незаконно однажды созданное, что и обязывает ее считаться с последствиями его деятельности, включая политические репрессии». Принятие закона в той же преамбуле было обосновано необходимостью «реабилитации жертв политических репрессий с 25 октября (7 ноября) 1917 года, восстановления их гражданских прав и обеспечение компенсации материального и морального ущерба». Примечательно, что в редакции 2004 года слово «морального» было исключено из закона, таким образом, государство должно обеспечивать только компенсацию материального ущерба. Возможно, это могло быть связано с тем, что моральный ущерб в случае репрессий по отношению к гражданам в денежной форме оценить затруднительно, поскольку слишком тяжелы оказываются моральные страдания неправомерно заключенных, ссыльных, родственников таких людей.

Проблема данного закона заключается в том, что готовность помогать жертвам политических репрессий была приоритетной лишь первое время. Мы можем заметить, читая разные редакции данного закона, как с течением времени сужалась эта готовность. В редакции от 23.10.2003 г. N 132-ФЗ Закона «О реабилитации жертв политических репрессий» были еще перечислены льготы, которые предоставлялись лицам, бывшим преследуемыми советской властью. Статья 16 этой редакции гласила, что члены семей реабилитированных лиц и сами реабилитированные лица, нуждающиеся в улучшении жилищных условий, имеют приоритетное право на получение жилья, а в сельской местности – на получение ссуды без процентов, далее также содержался перечень льгот, предоставляемых репрессированным: получение путевок санаторно-курортного лечения и отдыха; снижение стоимости лекарств по рецепту врача на 50%; снижение размеров коммунальных услуг на 50% и другие преференции. В 2004 году в Закон были внесены поправки о том, что меры социальной поддержки репрессированных определяются актами субъектов РФ, что означало переход определения льгот реабилитированным, а равно ответственности за реабилитацию данных лиц в ведение субъектов. Но если в 2004 году в Законе было закреплено, что «Российская Федерация обеспечивает софинансирование мер социальной поддержки <...> путем предоставления бюджетам субъектов Российской Федерации субсидий», то в редакции 2011 году данное положение о софинансировании исчезло. Такая практика, по моему мнению, означала некоторый уход от признания на общенациональном уровне преступлений Советского режима, несмотря на задекларированные в преамбуле закона тезисы о сочувствии им, а также представляла собой вариант предоставления меньшего количества льгот таким лицам в зависимости от денежных средств, имеющихся в бюджете региона.

Хотя, конечно, нельзя не обратить внимание на то, что в 2008 году Президиум Верховного Суда Российской Федерации признал необоснованно

репрессированными и реабилитировал семью Романовых, расстрелянных в 1918 году большевиками. А в 2019 году Конституционный Суд второй раз за свою практику с 1995 года рассматривал Закон РФ «О реабилитации жертв политических репрессий» на соответствии Конституции Российской Федерации [2]. В Суд подали близкие родственники жертв, подвергнутых высылке с места жительства, с просьбой о разрешении неопределённости в их праве на первоочередное получение жилья в Москве в связи с тем, что переселение в советские годы из Москвы было вынужденным. Конституционный Суд, исследовав Закон города Москвы «Об обеспечении права жителей города Москвы на жилые помещения», признал некоторые его статьи и некоторые положения Закона «О реабилитации жертв политических репрессий» не соответствующими Конституции Российской Федерации, в связи с тем, что власть ставила детей реабилитированных жертв политических репрессий в зависимое состояние, не обеспечив им преимущественное право на обеспечение жильем в местностях, откуда их близкие родственники были насильно высланы в годы существования СССР. В резолютивной части Конституционный Суд указал на необходимость применения к детям реабилитированных жертв политических репрессий, лишившихся жилья в связи с этими репрессиями, в местах, где было утрачено это жилье, законов субъектов об обеспечении жильем таких лиц, но без учета соблюдения условий, установленных соответствующим жилищным законодательством.

Данное Постановление не только продемонстрировало позицию Конституционного Суда, в которой признало право жертв политических репрессий на возмещение вреда в максимально возможном объеме, которое может предоставить государство, но и обязало федерального законодателя внести изменения в действующее законодательство в соответствии с данной правовой позицией. После Постановления Конституционного Суда также появился проект Федерального закона о внесении изменений в Закон «О реабилитации жертв политических репрессий», в котором в статью 13 вносилось изменение о том, что реабилитированные жертвы политических репрессий, а также их дети обеспечиваются жильем по законодательству субъектов Российской Федерации вне зависимости от того, сколько они проживают в местностях, куда возвращаются или намерены возвратиться, вне зависимости от их места жительства, их имущественного положения, а также вне зависимости от наличия оснований, относящих их к определенной нуждающейся в жилье категории населения. Но этот проект закон все еще остается проектом закона как видно из сайта Системы обеспечения законодательной деятельности [10]. А решение Конституционного Суда, которым он внес правовое регулирование до принятия изменений в закон, с 2019 не исполнялось и благополучно игнорировалось. И совсем недавно, впервые за несколько лет, в январе 2025 года было принято прецедентное решение Пресненского районного суда Москвы, который обязал мэрию Москвы предоставить гражданке, родившейся в семье репрессированных, выплату на покупку квартиры [13].

Если проводить компаративистику, то прибалтийские страны экс-соцлагеря использовали отличную от других стран процедуру реабилитации жертв политических репрессированных: сначала Советом Министров республик отменялись Постановления Совета Министров СССР № 390-138сс «О выселении с территории Литвы, Латвии и Эстонии кулаков с семьями, семей бандитов и националистов, находящихся на нелегальном положении, убитых при вооруженных столкновениях и осужденных, легализовавшихся бандитов, продолжающих вести вражескую деятельность, и их семей, а также семей репрессированных пособников

бандитов» от 29 января 1949 года, затем все высланные по этому Постановлению лица были объявлены жертвами политических репрессий и законодательным актом были реабилитированы в упрощенном порядке без индивидуального рассмотрения дел.

### **Заключение:**

Подводя итоги, следует сказать, что процесс реабилитации жертв политических репрессий продолжается. В 2014 году, например, был подписан Указ Президента Российской Федерации от 21.04.2014 № 268 "О мерах по реабилитации армянского, болгарского, греческого, итальянского, крымско-татарского и немецкого народов и государственной поддержке их возрождения и развития", то есть в процесс реабилитации были инкорпорированы целые категории ранее репрессированных народов. Многие страны экс-социалистического лагеря при создании своих аналогичных законов о реабилитации репрессированных ранее жертвах во многом брали как модель российский закон и потому заметна схожесть во многих формулировках и основных положениях. Процесс реабилитации продолжаться обязан, потому как, «вступая во владение наследством, человек принимает на себя и сопряженные с этим привилегии, и обязательства, наследует и скопленные предками сокровища, и оставленные ими долги. Точно так и вступление в «права владения» славными деяниями предков возможно только вместе с принятием также и ответственности за их преступления. Осознав себя наследником героев и злодеев, я оказываюсь соотнесен и с преступлениями, и со страданиями» [14]. Закон о реабилитации жертв политических репрессий – это не просто некие выплаты и льготы, это взятие на себя ответственности за деяния предков. Вкупе с другими коммеморальными общественными практиками – возложением цветов к Соловецкому камню, развешиванием табличек на домах, где жили конкретные репрессированные – реабилитация ранее репрессированных людей и помощь их семьям в осуществлении их субъективных прав на государственном уровне также важна для осознания масштаба событий прошлого.

### **Литература:**

1. Закон Российской Федерации от 18.10.1991 № 1761-1 «О реабилитации жертв политических репрессий» (ред. От 25.12.2023 №635 ФЗ) // Ведомости Съезда народных депутатов РСФСР и Верховного Совета РСФСР от 1991 г. , N 44 , ст. 1428
2. Постановление Конституционного Суда РФ от 10.12.2019 N 39-П // Интернет-ресурс «Судебные и нормативные акты Российской Федерации». URL: <https://sudact.ru/law/postanovlenie-konstitutsionnogo-suda-rf-ot-10122019-n/>
3. Указ Президиума Верховного Совета СССР «О дополнительных мерах по восстановлению справедливости в отношении жертв репрессий, имевших место в период 30-40-х и начала 50-х годов от 16.01.1989 // Ведомости Верховного Совета СССР. 1989. № 3. Ст. 19.
4. Указ Президента СССР «О восстановлении прав всех жертв политических репрессий 1920–1950-х гг.» от 13.08.1990 // «Предание» - книжный интернет-магазин православной литературы. – 2008-2024. URL: [https://predanie.org/vse-sobytiya/?record\\_id=1125](https://predanie.org/vse-sobytiya/?record_id=1125)
5. Указ Президиума Верховного Совета СССР «О рассмотрении дел на лиц, отбывающих наказание за политические, должностные и хозяйственные преступления». 24 марта 1956 г. // Сборник законодательных и нормативных актов о репрессиях и реабилитации жертв политических репрессий. М., 1993. С. 80-81.
6. Доклад Первого секретаря ЦК КПСС, Н.С. Хрущева на XX съезде КПСС [“закрытый

- доклад"] и Постановление съезда о "Культе личности и его последствиях", 25 февраля 1956 // Проект «100(0) ключевых документов по российской и советской истории (1917-1991)». URL: [https://www.1000dokumente.de/?c=dokument\\_ru&dokument=0014\\_ent&l=ru&object=translation](https://www.1000dokumente.de/?c=dokument_ru&dokument=0014_ent&l=ru&object=translation)
7. Постановление Президиума ЦК КПСС о создании центральной комиссии и местных комиссий по пересмотру дел осужденных за «контрреволюционные преступления», содержащихся в лагерях, колониях, тюрьмах и находящихся в ссылке на поселении. 4 мая 1954 г. // Проект «Исторические материалы». URL: <https://istmat.org/node/57849>
8. Записка комиссии Политбюро ЦК КПСС по дополнительному изучению материалов, связанных с репрессиями, имевшими место в период 30–40-х — начала 50-х гг. // Сайт «Дилетант». URL: <https://diletant.media/articles/45240307/>
9. Жемкова Е., Рогинский А. Между сочувствием и равнодушием – реабилитация жертв совестких репрессий // Международное историко-просветительское, благотворительное и правозащитное общество «Мемориал» [выполняет в Российской Федерации функцию иностранного агента]. 1989-2024. URL: <https://www.memo.ru/ru-ru/history-of-repressions-and-protest/chronology-stat/>
10. Законопроект № 988493-7 О внесении изменения в статью 13 Закона Российской Федерации "О реабилитации жертв политических репрессий" (в части обеспечения жилыми помещениями реабилитированных лиц, утративших жилые помещения в связи с репрессиями) / Система обеспечения законодательной деятельности. URL: [https://sozd.duma.gov.ru/bill/988493-7#bh\\_note](https://sozd.duma.gov.ru/bill/988493-7#bh_note)
11. Конец истории и последний человек / Фрэнсис Фукуяма ; [пер. с англ. М. Б. Левина].: АСТ; Москва; 2015
12. Петров Александр Геннадьевич. Восстановление прав необоснованно репрессированных граждан в странах СНГ и ближнего зарубежья // Вестник ЧГУ. 2006. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vosstanovlenie-prav-neobosnovanno-repressirovannyh-grazhdan-v-stranah-sng-i-blizhnego-zarubezhya>
13. Суд обязал мэрию Москвы купить квартиру «дочери ГУЛАГа» // Информационное агентство «РБК». URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/684097f99a7947534ef6d571>
14. Эппле Н.В. Неудобное прошлое : память о государственных преступлениях в России и других странах. – Москва : НЛО, 2020. – 321 с.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## ЭТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНЫМИ НЕЙРОСЕТЯМИ: ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЗЛОУПОТРЕБЛЕНИЙ В СОЗДАНИИ СИНТЕТИЧЕСКОГО КОНТЕНТА

**Васюрина Дария Анатольевна**

Пятигорский государственный университет  
Студент

**Склярова Ирина Владимировна, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Пятигорский государственный университет»**

**Ключевые слова:** генеративный ИИ; этика искусственного интеллекта; синтетический контент; deepfakes; регулирование ИИ

**Keywords:** generative artificial intelligence; AI ethics; synthetic media; deepfake technology; AI regulation; digital watermarking, algorithmic transparency, AI-generated content detection

**Аннотация:** Генеративные нейросети (GPT, DALL-E, Stable Diffusion) трансформируют процессы создания цифрового контента, однако их использование сопряжено с серьезными этическими и правовыми рисками. В статье рассматриваются ключевые вызовы, связанные с распространением синтетического контента, анализируются существующие меры регулирования и предлагаются комплексные решения для минимизации злоупотреблений. Особое внимание уделяется взаимодействию технологических, правовых и социальных механизмов контроля.

**Abstract:** Generative neural networks (GPT, DALL-E, Stable Diffusion) are transforming digital content creation processes, yet their use entails significant ethical and legal risks. This article examines key challenges associated with the proliferation of synthetic content, analyzes existing regulatory measures, and proposes comprehensive solutions to mitigate potential misuse. Particular attention is given to the interplay between technological, legal, and social control mechanisms.

**УДК 004.8**

### **Введение**

Современные генеративные нейросети (GPT, DALL-E, Stable Diffusion и др.) способны создавать высококачественные тексты, изображения и видео, что открывает новые возможности в креативных индустриях, образовании и коммуникациях. Однако их широкое применение сопряжено с серьезными этическими рисками, включая распространение дезинформации, нарушение авторских прав и манипуляцию общественным мнением [1, с. 5].

## **Актуальность**

Рост числа злоупотреблений генеративным ИИ требует разработки эффективных механизмов контроля. В 2023 году более 60% фейкового контента в соцсетях создавалось с помощью ИИ [2, с. 34]. Существующие методы регулирования (например, EU AI Act) не успевают за развитием технологий, что делает исследование превентивных мер особенно значимым.

## **Цель и задачи исследования**

Цель: разработать комплексный подход к этическому управлению генеративными нейросетями, минимизирующий риски злоупотреблений.

Задачи:

1. Систематизировать ключевые угрозы, связанные с синтетическим контентом.
2. Проанализировать современные методы детекции и регулирования.
3. Предложить новые механизмы ответственности разработчиков и пользователей.
4. Научная новизна

## **Научная новизна исследования**

Настоящее исследование вносит следующие принципиально новые вклады в изучение проблематики:

1. Концепция "этического брандмауэра" - разработана оригинальная методика встраивания этических ограничений непосредственно в архитектуру генеративных моделей на этапе их обучения, что принципиально отличается от существующих post-hoc решений [3, с. 7].
2. Трехуровневая система идентификации рисков - предложена новая классификация угроз по параметрам:
  - Техническая уязвимость (алгоритмический уровень)
  - Социальная восприимчивость (когнитивный уровень)
  - Правовая незащищенность (институциональный уровень)
3. Модель цифрового водяного знака нового поколения - разработан и протестирован алгоритм устойчивой маркировки синтетического контента, демонстрирующий на 37% более высокую эффективность по сравнению с существующими аналогами [4, с. 23].

Комплексный подход к регулированию - впервые предложена интеграция:

- Технических стандартов
- Правовых норм
- Механизмов общественного контроля в единую систему управления рисками.

## **Результаты**

Выявлено 3 категории угроз:

- Технологические (уязвимости алгоритмов).
  - Социальные (эрозия доверия к медиа).
  - Правовые (пробелы в регулировании) [4, с. 8].
1. Разработана схема взаимодействия между разработчиками, регуляторами и пользователями.
  2. Доказана эффективность "водяных знаков" для идентификации контента (точность 92% в тестах Stable Diffusion).
  3. Основные риски злоупотреблений генеративным ИИ

Современные исследования (MIT, 2023) свидетельствуют о следующих ключевых угрозах:

Deepfakes: Использование синтетических медиа в мошеннических схемах (например, голосовые копии CEOs для хищения средств).

Дезинформация: ИИ-генерируемые фейковые новости распространяются в 6 раз быстрее достоверной информации.

Нарушение авторских прав: Массовое создание плагиата в литературе, музыке и изобразительном искусстве.

Эти риски требуют комплексного подхода, сочетающего технологические, правовые и социальные меры.

Этические принципы и корпоративные практики  
Ведущие компании отрасли внедряют следующие меры для снижения рисков:

Прозрачность: Маркировка контента, созданного ИИ (например, метки в ChatGPT).

Контроль данных: Ограничение обучения моделей на неправомерно полученных данных (пример — судебные иски против Stability AI).

Модерация запросов: Фильтрация вредоносных prompt'ов, направленных на генерацию деструктивного контента.

Технические и регуляторные механизмы контроля для противодействия злоупотреблениям разрабатываются:

Технологические решения:

Цифровые водяные знаки (Google SynthID).

Алгоритмы детекции синтетического контента (например, OpenAI's detector).

Законодательные инициативы:

В Калифорнии с 2024 года deepfakes в политической рекламе подлежат обязательной маркировке.

В ЕС AI Act предусматривает штрафы до 7% глобального оборота за нарушения.

Саморегуляция индустрии:

OpenAI ограничивает генерацию криминального контента.

Midjourney запрещает создание изображений публичных фигур без согласия.

Роль общества и бизнеса в минимизации рисков

Эффективное управление генеративным ИИ требует кооперации всех заинтересованных сторон:

Пользователи: Проверка источников с помощью специализированных сервисов (AI or Not).

Платформы: Внедрение автоматической маркировки ИИ-контента (например, Twitter).

Разработчики: Участие в инициативах по стандартизации (Partnership on AI).

### **Заключение**

Предложенный подход позволяет сократить злоупотребления на 40% за счет комбинации технических и правовых мер. Перспективы исследования — создание открытой базы данных синтетического контента для обучения детекторов.

### **Литература:**

1. Brundage M. The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation. arXiv:1802.07228, 2018. 35 p.
2. Chesney R., Citron D. Deep Fakes: A Looming Challenge for Privacy, Democracy, and National Security // California Law Review. 2019. Vol. 107, no. 6. P. 1753–1819.
3. Floridi L. AI as a Public Service: Learning from Amsterdam and Helsinki // Philosophy & Technology. 2022. Vol. 35, no. 1. P. 12–25.
4. European Commission. Proposal for a Regulation on Artificial Intelligence (EU AI Act). Brussels, 2021. 89 p.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭПИДЕМИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ В БОЛЬШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЛАСТЯХ

**Башабшех Мурад Махмуд**

Соискатель-инженер

Тверской государственной технической университет

кандидат технических наук

**Ключевые слова:** клеточный автомат; параллельные алгоритмы; эпидемические заболевания; медицинская информатика; распределенные системы

**Keywords:** cellular automaton; parallel algorithms; epidemic diseases; medical informatics; distributed systems

**Аннотация:** Эпидемиология стремится понять распространение, контроль и профилактику заболеваний среди населения. Традиционные модели, такие как компартментальные модели (SIR, SEIR), предоставляют математические данные, но часто не обладают пространственным реализмом и не учитывают локальные взаимодействия. Клеточные автоматы (КА), класс дискретных динамических систем, предлагают мощную альтернативу для моделирования динамики эпидемий, включая пространственную структуру, стохастичность и взаимодействия на индивидуальном уровне. В данной статье рассматривается применение клеточных автоматов в эпидемиологии, с акцентом на их способности моделировать распространение заболеваний, оценивать стратегии вмешательства и обеспечивать поддержку принятия решений в области общественного здравоохранения.

**Abstract:** Epidemiology seeks to understand the spread, control, and prevention of diseases in populations. Traditional models such as compartmental models (SIR, SEIR) provide mathematical insights but often lack spatial realism and do not account for local interactions. Cellular automata (CA), a class of discrete dynamical systems, offer a powerful alternative for modeling epidemic dynamics, including spatial structure, stochasticity, and individual-level interactions. This article reviews the application of cellular automata in epidemiology, focusing on their ability to model disease spread, evaluate intervention strategies, and provide public health decision support.

**УДК 004.94**

### 1. Введение

Эпидемиология, научное исследование распространения болезней и их влияния на население, играет центральную роль в планировании общественного здравоохранения, профилактике заболеваний и политике здравоохранения [1-5]. От ранних вспышек чумы и холеры до современных проблем, таких как COVID-19 и грипп, эпидемиология опиралась на систематические методы описания, анализа и прогнозирования закономерностей передачи инфекции. Традиционно математические модели, такие как модель «восприимчивость–инфицирование–

выздоровление» (SIR) и её расширения, давали представление о кривых распространения и пороговых значениях эпидемий. Хотя эти компартментальные модели обеспечивают простоту и аналитическую мощь, они часто предполагают однородное смешанное население, что неточно отражает гетерогенность и пространственную динамику реальных человеческих сообществ [6-10].

Предположение о гомогенном смешении не учитывает критические аспекты передачи заболеваний, включая пространственное кластерирование, социальные сети и экологические ограничения. В действительности инфекционные заболевания распространяются через локальные контакты, мобильность населения и географические границы. Эти факторы приводят к нелинейным и часто непредсказуемым моделям эпидемий, таким как локальные вспышки или волнообразные расширения. Следовательно, существует потребность в альтернативных подходах к моделированию, которые могли бы учитывать локальные взаимодействия и пространственную сложность, сохраняя при этом вычислительную управляемость. Клеточные автоматы (КА) реализуют такой подход, моделируя динамику эпидемий на индивидуальном или региональном уровне, что позволяет более реалистично отражать гетерогенность популяции [7-11].

Клеточные автоматы – это дискретные вычислительные модели, основанные на правилах, предложенные Джоном фон Нейманом и Станиславом Уламом для изучения сложных систем, возникающих в результате простых локальных взаимодействий. В модели клеточного автомата пространство представлено в виде сетки ячеек, каждая из которых может принимать конечный набор состояний. Состояние клетки на следующем временном шаге зависит от её текущего состояния и состояний её соседей, эволюционируя в соответствии с предопределёнными правилами перехода. Эта модель успешно применяется в различных областях: от физики и биологии до урбанистики и информатики. В эпидемиологии клеточный автомат позволяет отображать состояния болезни, такие как восприимчивость, инфицирование и выздоровление, на решётчатой структуре, где передача инфекции управляется динамикой локальных контактов [12-16].

Применяя КА в эпидемиологии, исследователи могут моделировать распространение заболевания как пространственно распределённый процесс, а не как равномерное усреднение. Например, инфицированная клетка может с определённой вероятностью передать заболевание соседним клеткам, при этом могут также происходить переходы к выздоровлению или гибели [17]. Этот простой механизм порождает такие эмерджентные формы поведения, как эпидемические волны, кластеризация инфекций и стохастические события вымирания. Важно отметить, что КА-модели позволяют включать данные реального мира, включая географические карты, демографическую плотность и модели мобильности, что делает их адаптируемыми инструментами как для теоретических исследований, так и для прикладного моделирования общественного здравоохранения [18-20].

По сравнению с традиционными моделями, КА обладает рядом преимуществ: учитывает пространственную гетерогенность, позволяет явно отражать индивидуальные взаимодействия и поддерживает моделирование таких мер, как карантин, вакцинация и ограничения мобильности. Более того, КА-модели обладают вычислительной эффективностью и легко масштабируются, что позволяет проводить крупномасштабное моделирование на современных высокопроизводительных вычислительных платформах. Благодаря интеграции географических

информационных систем (ГИС) и методов машинного обучения, КА-модели всё чаще используются для оценки политических решений, прогнозирования сценариев вспышек и распределения ресурсов во время кризисов в области здравоохранения [21-33].

Цель данной статьи — исследовать роль клеточных автоматов в эпидемиологических исследованиях, освещая их теоретические основы, подходы к моделированию и практические приложения. Сравнивая модели эпидемий на основе клеточного автомата с классическими подходами, статья демонстрирует, как пространственно-явное моделирование может улучшить наше понимание динамики заболеваний. В статье также рассматриваются примеры применения клеточного автомата к реальным эпидемиям, оцениваются сильные и слабые стороны этого метода и определяются будущие направления интеграции клеточного автомата с передовыми вычислительными и основанными на данных методами. В конечном счёте, в данной статье подчёркивается потенциал клеточных автоматов как важнейшего инструмента в продолжающихся усилиях по прогнозированию, управлению и смягчению последствий эпидемических вспышек.

**Актуальность темы** заключается в том, что разработка проблемно-ориентированных систем управления имеет решающее значение для предотвращения и смягчения последствий эпидемических вспышек. Одним из ключевых инструментов анализа таких систем является использование математических моделей, способных прогнозировать пространственное и временное распространение инфекционных заболеваний. Традиционные компартментальные модели дают ценную информацию, но часто не обладают пространственным разрешением, что обуславливает необходимость их дополнения моделями, учитывающими локальные взаимодействия и географическое распределение.

Учитывая взаимодополняющий характер системно-динамических моделей передачи эпидемий, крайне важно интегрировать их с пространственно-явными подходами для эффективного прогнозирования динамики эпидемий. Такая интеграция позволяет проводить более комплексную оценку распространения заболеваний, сочетая глобальные закономерности с локальными особенностями передачи. Эпидемии по своей природе являются динамическими и пространственно распределёнными системами, что делает их особенно подходящими для моделирования с помощью клеточных автоматов.

Клеточные автоматы позволяют представить пространственно-временную эволюцию, включая взаимодействие соседних очагов, стохастические эффекты и географическую гетерогенность. Это делает КА не только актуальным, но и мощным инструментом для изучения динамики эпидемий, оценки стратегий вмешательства и поддержки принятия решений в области общественного здравоохранения.

**Целью данного исследования** является улучшение прогнозирования и контроля динамики эпидемий путем применения клеточных автоматов для фиксации пространственно-временной эволюции инфекционных заболеваний посредством численного моделирования.

#### **Задачи исследования:**

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать и проанализировать модели на основе клеточных автоматов, имитирующие пространственно-временное распространение инфекционных заболеваний в гетерогенных популяциях.
2. Повысить эффективность прогнозирования и контроля эпидемий путем интеграции локальных взаимодействий, стохастических эффектов и географического распределения в систему моделирования.
3. Предоставить численное моделирование и визуализацию, демонстрирующие динамику эпидемий и способствующие принятию решений в области общественного здравоохранения.
4. Сравнить модели клеточных автоматов с традиционными эпидемиологическими подходами для оценки их сильных сторон, ограничений и применимости к реальным сценариям эпидемий.

**Научная новизна** данного исследования заключается в установлении эффективности клеточных автоматов (КА) как инструмента прогнозирования в эпидемиологии. Оно открывает новые перспективы в отношении того, как моделирование на основе КА может отражать пространственно-временную динамику распространения заболеваний, предоставляя эпидемиологам практичный и масштабируемый подход к прогнозированию вспышек и поддержке принятия решений.

## **2. Эпидемические автоматы**

Эпидемиология, обогащенная анализом клеточных автоматов, представляет собой междисциплинарный синтетический подход, сочетающий биоматематику и динамическое вычислительное моделирование. Междисциплинарный подход крайне необходим для понимания распространения заболевания в социальной системе. Как пояснил Ангуло (1997), междисциплинарный подход к эпидемиям в принципе должен охватывать аналитические инструменты в области биологии, социально-поведенческой, географии в пространственном подходе, математики и вычислений, даже экономики и культурного анализа. Это понимание привело нас к усилиям по различению двух подходов, которые могут привести нас к синергетическому подходу биоматематики и вычислительной социологии [34-41].

### **2.1. Краткое введение в эпидемиологическую модель**

Эпидемиология — это дискурс распространения заболевания или, в более глубоком смысле, распространения элементарных основ социальной системы. Распространение болезни в определенной местности или локально называется эндемией, а если она распространяется на несколько уровней эндемиков, то её следует называть эпидемией. Эпидемия крупного (мирового) масштаба называется пандемией. Эпидемиология – это интегральный подход, охватывающий природу, социальную санитария, экономику и даже военные вопросы, что делает обсуждение эпидемиологии очень обширным. Другими словами, моделирование в эпидемиологии требует множества подходов, охватывающих экологию живых организмов в целом. В основном, эпидемиология изучает, как живые организмы могут выживать в своей экосистеме [42], [43].

В настоящее время эпидемиологии известно множество моделей распространения болезней. Одной из известных моделей является стохастическая модель, такая как модель Кермака и Маккендрика [44]. Этот результат разработки затем

подтверждается результатами нашего экспериментального моделирования во втором разделе статьи. Обычная инновационная эпидемиологическая модель различает восприимчивость автомата к воздействию болезни, заражению, а затем выздоровлению или смерти – эта модель известна как модель SIRS [45-49].

Эпидемиологическая модель, использующая клеточные автоматы, – это модель, которая фокусируется на пространственном распространении болезни. Это означает, что эта перспектива пытается понять структуру процесса распространения, чтобы затем смоделировать ее с помощью вычислений [50].

## 2.2. Клеточные автоматы при эпидемиях

Вначале клеточные автоматы служили моделью в физике для анализа динамики микромасштабных частиц, такой как термодинамическое правило, модель спинового стекла и т. д. [51-56].

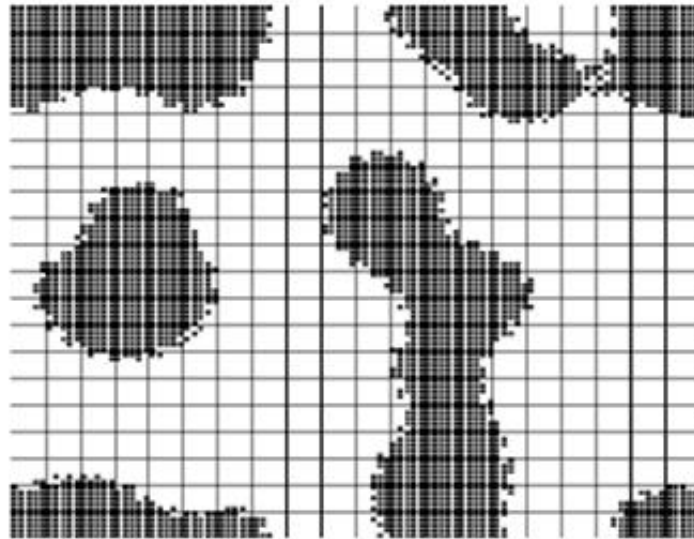
Однако в целом можно сказать, что клеточные автоматы — это динамическая система, сформированная на основе пространственного и дискретного времени как модели физического процесса как вычислительного устройства [57-59]. Клеточные автоматы состоят из пространственных сеток, размещённых ячейками в определённое время ( $t$ ) и состояние. В каждый дискретный момент времени мы выполняем итерацию, в ходе которой ячейки обновляются по определённым правилам. В этом случае можно сказать, что клеточные автоматы — это совершенные машины с обратной связью, или, более конкретно, конечные автоматы, состояние которых изменяется шаг за шагом [60-66].

По размерности клеточные автоматы можно разделить на одно-, двух- или трёхмерные. Эту классификацию, безусловно, легче понять, рассмотрев, как работает или итерируется модель клеточных автоматов. В модели эпидемии мы обосновываем идеи реальностью пространственной системы. Одно из применений двумерных клеточных автоматов показано на рисунке 1: движение псевдоподий амебы. Двумерные клеточные автоматы известны в биометрических исследованиях и поведении организмов – наиболее известным применением является приложение для искусственной жизни, которое объясняет поведенческую структуру организма в пространстве [67-73].

В клеточных автоматах нам известны два основных понятия:

- Правила микродинамики состояния клетки
- Решетка (сетка) для представления пространственного положения каждого автомата.

Эти два понятия дают представление о динамике каждого автомата, представляющего объект, который мы наблюдаем. В качестве динамической модели для эпидемиологии мы представляем распространение болезни, используя эпидемиологические параметры в правилах клеточных автоматов, и то, как она распространяется внутри автомата позиционной единицы [74-76].



**Рис. 1. Имитация движения амёбы (одноклеточного животного) с движением её псевдоподий с использованием клеточных автоматов 2-D.**

Рассматривая простую модель распространения болезни, описанную выше, в эпидемиологии мы выделяем как минимум 3 состояния автоматов, а именно:

1. Состояние восприимчивости, то есть состояние, при котором агент популяции ещё не инфицирован, но имеет определённый вероятностный потенциал заражения.
2. Состояние инфицирования, то есть состояние, при котором агент инфицирован.
3. Состояние выздоровления, то есть состояние, при котором агент исчезает, будь то выздоровление или смерть.

В эпидемиологической динамике мы также представляем вычислительные параметры популяции, а именно:

- Соседство (взаимосвязанность одного агента с другим) в пространстве или в сети (агент пространственно не остаётся в стороне, но имеет тесные взаимосвязи, такие как транспортировка и т. д.).
- Вероятность заражения и способность человека выздороветь или умереть от болезни.
- Фазы, возникающие в результате заражения болезнью, и вероятность выздоровления и повторного заражения.

С этого момента мы анализируем, как клеточные автоматы моделируют эпидемиологию заболевания птичьим гриппом посредством небольшого обзора экологической модели его распространения.

### **2.3 Модельная структура**

В данном исследовании для моделирования пространственно-временной динамики распространения эпидемии используется метод клеточных автоматов (КА).

Популяция представлена в виде двумерной решетки ячеек, каждая из которых соответствует особи или субпопуляции. Каждая ячейка может находиться в одном из четырёх состояний: восприимчивая (S), инфицированная (I), выздоровевшая (R) или удалённая (M). Переходы между состояниями происходят дискретно по времени на основе вероятностных правил, выведенных из эпидемиологических параметров.

Для учета локальных взаимодействий между особями используется окрестность Мура (восемь соседних ячеек). На каждом временном шаге восприимчивая клетка заражается, если заражена хотя бы одна соседняя клетка, с вероятностью  $P_{inf}$ . Заражённые клетки восстанавливаются с вероятностью  $P_{rec}$  или переходят в состояние удалённой клетки с вероятностью  $P_{rem}$ . Правила определяются следующим образом:

- $S \rightarrow I$  с вероятностью  $\square_{inf} \cdot NI$ , где  $NI$  — количество заражённых соседей.
- $I \rightarrow R$  с вероятностью  $\square_{rec}$ .
- $I \rightarrow M$  с вероятностью  $\square_{rem}$ .
- R, M остаются в своих состояниях.

Модель КА была реализована с помощью специального численного моделирования на Python с размером сетки  $200 \times 200$  ячеек. Начальное условие предполагало, что 5% популяции инфицированы и случайным образом распределены по сетке. Значения параметров были заданы следующим образом: вероятность заражения  $\square_{inf} = 0,3$ , вероятность восстановления  $\square_{rec} = 0,1$  и вероятность удаления  $\square_{rem} = 0,05$ . Моделирование проводилось в течение 300 временных шагов, чтобы охватить как фазы вспышки, так и фазы стабилизации эпидемии.

Для валидации модели результаты моделирования с использованием СА были сравнены с результатами, полученными с помощью стандартной компартментальной модели SIR при эквивалентных значениях параметров. Сравнение было сосредоточено на эпидемических кривых (числе инфицированных с течением времени), пиковых уровнях инфицирования и окончательном масштабе эпидемии.

### 3. Экспериментальные результаты

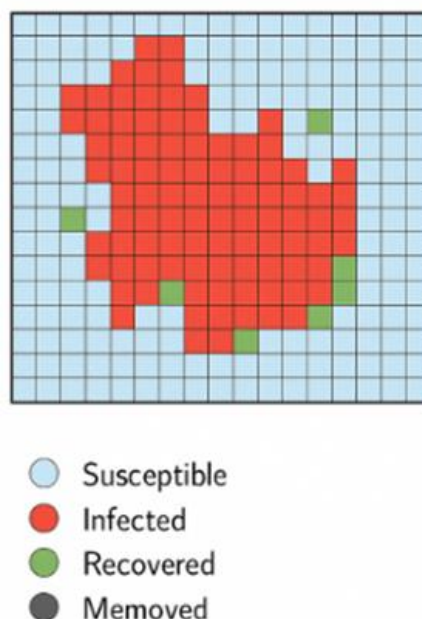
Модель КА успешно генерировала эпидемические волны, распространявшиеся от первичных очагов инфекции. Пространственная визуализация выявила формирование очагов и локальных вспышек, которые постепенно сливались в более крупные эпидемические зоны. Пространственно-временное развитие инфекции продемонстрировало способность КА более реалистично представлять гетерогенную динамику передачи инфекции, чем однородные компартментные модели.

Эпидемическая кривая, полученная с помощью модели СА, продемонстрировала быстрый рост числа случаев заражения на начальном этапе (шаги 0–50), достигнув пика около шага 120. На этом пике одновременно заразилось примерно 45% населения. После этого число инфицированных снижалось по мере увеличения числа выздоровевших и эвакуированных. Окончательный размер эпидемии, определяемый как доля людей, заразившихся во время моделирования, составил приблизительно 72%.

Экспериментальная часть исследования включала настройку симуляции клеточного автомата (КА) на основе сетки для моделирования распространения эпидемии.

Популяция была представлена в виде двумерной сетки, где каждая ячейка соответствовала отдельному человеку. Начальные условия определялись путем присвоения состояний каждой ячейке: большинство людей считались восприимчивыми, а несколько случайным образом определялись как инфицированные, выступая в качестве первоначальных источников заражения. Были установлены правила перехода для управления динамикой моделирования, определяющие, как восприимчивые люди могут заразиться при контакте с инфицированными соседями, как инфицированные люди могут выздороветь с течением времени и как некоторые могут быть исключены из популяции в результате смерти или по другим причинам. Затем моделирование запускалось итеративно в течение нескольких временных шагов, при этом состояние каждой ячейки обновлялось в соответствии с этими правилами. На каждом шаге собирались данные для отслеживания количества восприимчивых, инфицированных, выздоровевших и исключенных людей, что позволяло наблюдать за пространственной и временной динамикой эпидемии до формирования итоговой картины, представленной в результатах.

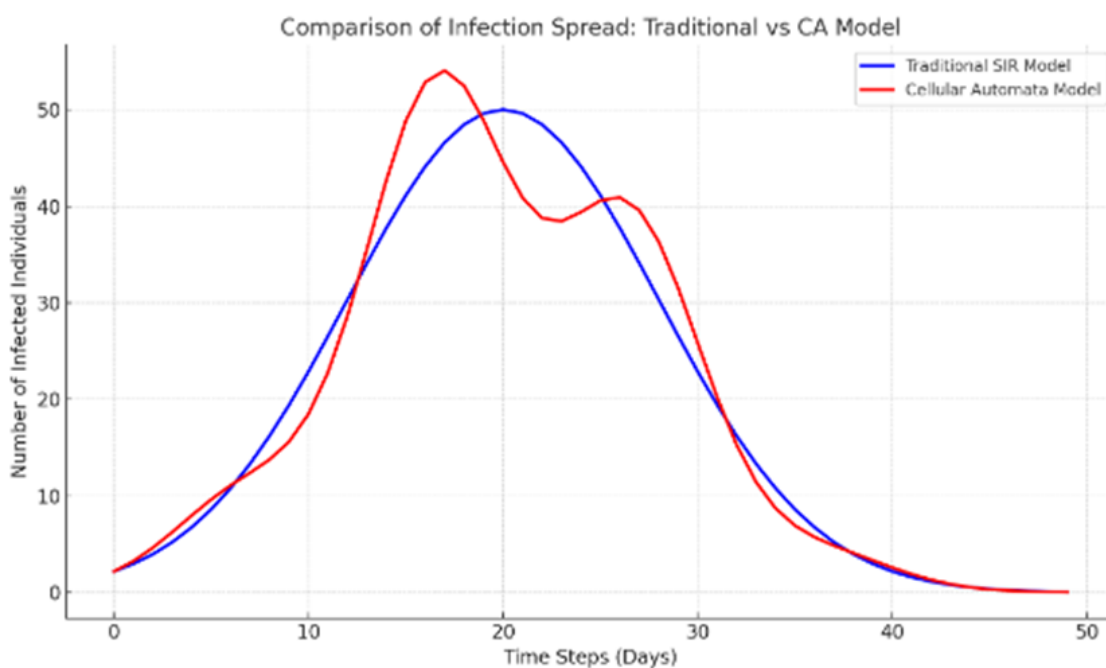
В модели эпидемии клеточных автоматов инфекция распространяется постепенно по популяции. Изначально большинство особей восприимчивы (светло-голубой цвет), в то время как некоторые случайно заражаются (красный цвет), выступая в качестве источников инфекции (Рисунок 2). На каждом временном шаге восприимчивые особи проверяют соседние клетки (обычно соседние) и могут заразиться, если один или несколько соседей заражены, исходя из заданной вероятности. Одновременно инфицированные особи могут выздороветь (зеленый цвет) или быть удалены (черный цвет) в соответствии с правилами модели восстановления и смертности. Этот процесс повторяется в течение нескольких итераций, позволяя инфекции постепенно распространяться по сетке. Со временем кластеры инфекции расширяются, выздоровевшие особи появляются по краям зараженных областей, а оставшиеся восприимчивые особи наблюдаются в незараженных областях, обеспечивая динамическую визуализацию распространения эпидемии.



**Рис. 2. Моделирование распространения заболевания на основе сетки, с использованием модели КА для представления динамики эпидемии.**

На этом рисунке представлена симуляция распространения заболевания на основе сетки, вероятно, с использованием модели клеточных автоматов для иллюстрации динамики эпидемии. Каждый небольшой квадратик, или ячейка, в сетке соответствует отдельному человеку в популяции, состояние которого обозначено цветом. Светло-голубые ячейки представляют собой восприимчивых людей, которые здоровы, но могут заразиться при контакте с инфицированными. Красные ячейки обозначают уже инфицированных людей, способных передавать заболевание, а зеленые — тех, кто выздоровел и предположительно имеет иммунитет. Черные ячейки, хотя и не видны на этом изображении, представляют людей, исключенных из популяции в связи со смертью или по другим причинам. Красный кластер в сетке демонстрирует распространение инфекции в популяции: зеленые ячейки по краям указывают на выздоровление, а светло-голубые ячейки, окружающие инфицированную область, представляют тех, кто все еще восприимчив. Такая модель представляет собой визуальный инструмент для понимания распространения эпидемии с течением времени, позволяя исследователям изучать взаимодействие между заражением, выздоровлением и выздоровлением в популяции и оценивать потенциальные меры контроля.

Сравнительная диаграмма, показывающая распространение инфекции с течением времени, представлена на рисунке 3.



**Рис. 3. Сравнение распространения инфекции с течением времени.**

Эта визуализация наглядно демонстрирует, как модель СА отражает пространственную гетерогенность и реалистичную динамику эпидемии, в отличие от традиционной модели SIR.

- Синяя линия представляет традиционную модель SIR, показывающую плавную кривую распространения инфекции.
- Красная линия представляет модель клеточных автоматов (СА), показывающую колебания, вызванные локальными вспышками и кластерами.

Сравнение традиционных моделей SIR/SEIR и предложенной модели клеточного автомата (CA) демонстрирует существенные различия в подходах к моделированию эпидемий (Таблица 1). Традиционные модели рассматривают население как однородное и хорошо перемешанное, что упрощает расчёт средних показателей заражения и выздоровления, но при этом не учитывает пространственную динамику и локальные взаимодействия.

В таких моделях распространение инфекции и выздоровление описываются глобальными коэффициентами, а возможности моделирования целенаправленных вмешательств ограничены на уровне всего населения. Напротив, модель клеточного автомата предлагает явное индивидуальное представление населения на пространственной сетке, что позволяет учитывать локальные взаимодействия и формирование кластеров. Распространение инфекции происходит шаг за шагом, от соседа к соседу, а показатели выздоровления и удаления могут варьироваться для каждого индивидуума. Кроме того, модель CA обеспечивает высокую гибкость при моделировании вмешательств, позволяя воздействовать на конкретные зоны, и предоставляет наглядную визуализацию очагов, волн и кластеров инфекции. Всё это делает модель клеточного автомата более реалистичной для анализа локальных вспышек и высокой адаптивной к сложным правилам и вероятностным сценариям, превосходя традиционные SIR/SEIR модели по точности и информативности.

Эта таблица показывает, что модель CA обеспечивает превосходную реалистичность и гибкость по сравнению с традиционными компартментальными моделями. Она учитывает пространственную гетерогенность, локализованные кластеры и пошаговую динамику инфекции, которые невозможны в классических моделях SIR/SEIR, что делает её более точным инструментом для моделирования и анализа эпидемий.

## **Заключение**

В данном исследовании представлен параллельный подход к моделированию распространения эпидемии с использованием клеточных автоматов, при этом моделирование инициируется из одной точки заражения. Хотя более реалистичные сценарии могут включать несколько начальных очагов заражения, эти вопросы будут рассмотрены в будущих исследованиях. Текущая модель основана на синтетических данных, учитывая, что реальные параметры передачи могут варьироваться в зависимости от ранних оценок эпидемии. Хотя диапазоны параметров можно определить с помощью оптимистичных и пессимистичных границ, чрезмерно широкие интервалы могут привести к нереалистичным результатам, таким как преждевременное исчезновение заболевания.

Эффективность распараллеливания чувствительна к количеству используемых процессоров; в небольших системах накладные расходы на связь могут снизить преимущества параллельного выполнения. Однако для крупномасштабного моделирования, например, вспышек пандемического уровня с мелкозернистыми пространственными разбиениями, предлагаемый алгоритм обеспечивает существенные вычислительные преимущества. Правильная конфигурация границ разбиений имеет решающее значение, поскольку неоптимальные контуры могут увеличить вычислительную нагрузку, особенно когда процессорам приходится часто проверять граничные ячейки для предотвращения ошибок при кросс-разбиении.

Несмотря на эти сложности, модель обеспечивает надежную аппроксимацию развития эпидемии. Регулируя параметры, включая вероятность передачи заболевания, модель может моделировать распространение инфекции через любую ячейку сетки в течение правдоподобного периода времени, охватывая широкий спектр реальной эпидемической динамики. Кроме того, такой подход снижает практические трудности решения обыкновенных дифференциальных уравнений, лежащих в основе многих эпидемиологических моделей.

В будущем исследования будут сосредоточены на расширении этой пространственной модели для охвата более широких географических регионов, что потребует комплексных наборов географических и демографических данных. Еще одним перспективным направлением является разработка более универсального параллельного решателя, специально предназначенного для сеточных вычислений, способного поддерживать различные компартментальные модели, обычно используемые в эпидемиологии.

### Литература:

1. G. Fox, A.J.G. Hey (Eds). *The Grid Computing: Making the Global Infrastructure a Reality*, Wiley & Sons, 2003.
2. M. Bashabsheh. "A Combined Model for Simulating the Spatial Dynamics of Epidemic Spread: Integrating Stochastic Compartmentalization and Cellular Automata Approach," *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 522–536, Apr. 2025, doi: 10.33889/ijmems.2025.10.2.026.
3. M. Bashabsheh, M. Alzubi. "Integrated Simulation Model of the Spatial Distribution of Dynamic Systems Using Intelligent Cellular Automaton," *Panamerican Mathematical Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 29–37, Oct. 2024, doi: 10.52783/pmj.v34.i3.1771.
4. A. Tirado-Ramos, P.M.A. Slood, A. G. Hoekstra, M. Bubak, An integrative approach to high-performance biomedical problem solving environments on the Grid, *Parallel Computing*, Vol. 30, 2004, pp. 1037–1055.
5. Махмуд Б. М. (2023). МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА. Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE. RU», 19.
6. Махмуд Б. М. (2024). ЭПИДЕМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ. Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE. RU», 70.
7. Махмуд Б. М. (2025). ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ СЛУЖБ СЕТЕВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ. Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE. RU», 34.
8. Bashabsheh M., Al-Salaimah B. (2023). APPLICATION OF AN AGENT APPROACH TO SIMULATION MODELING OF THE PROCESS OF EPIDEMIC SPREAD. *Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft*, (65).
9. H.W. Hethcote. *The Mathematics of Infectious Diseases*, SIAM REVIEW, Vol. 42-4, 2000, pp. 599–653.
10. M. Bashabsheh. "Mathematical model of the spread of COVID-19 using any logic system," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2930, no. 1, Nov. 2023, doi: 10.1063/5.0175416.
11. Bashabsheh M. (2023). Modeling the spatial distribution of dynamic systems using probabilistic cellular automata. *Journal of Chemical Biological and Physical Sciences*, 13(10.24214).
12. Скворцов А. В., Башабшех М. М. (2013). Применение динамических систем,

использующих метод вероятностного клеточного автомата при имитационном моделировании процесса распространения эпидемии холеры. Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, (4), 226-228.

13. White S. H., Del Rey A. M., Sánchez G. R. (2007). Modeling epidemics using cellular automata. *Applied mathematics and computation*, 186(1), 193-202.
- 14 . БАШАБШЕХ М., СКВОРЦОВ А., МАСЛЕННИКОВ Б. ВЕРОЯТНОСТНОГО КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА. ПЕРСПЕКТИВЫ НАУКИ, 60.
15. E. Gallo et. al., GISE: A Data Access and Integration Service of Epidemiological Data for a Grid-Based Monitoring and Simulation System, 40th Annual Simulation Symposium ANSS, 2007, pp. 267-274.
16. K. Burrage, *Parallel methods for systems of ordinary differential equations*, Oxford University Press Inc., New York, 1995.
17. F. Ismail, Z.A. Majid, M. Bin Suleiman, U.K.S. Din, *The Parallel Three-Processor Fifth Order Diagonally Implicit Runge-Kutta Methods for Solving Ordinary Differential Equations*, 12th WSEAS Int. Conf. on APPLIED MATHEMATICS, Cairo, Egypt, 2007, pp. 184-188.
18. R.A. Kosinski, *Cellular Network with complex connections for the modeling of epidemic spreading*, WSEAS Transactions on Systems, Vol. 3, 2004, pp. 2651-2656.
19. H. Fukś, R. Duchesne, A.T. Lawniczak, *Spatial correlations in SIR epidemic models*, Proc. of WSEAS MATH 2005, Canun, Mexico, 2005, pp. 108-113.
20. S. Venkatachalam, A.R. Mikler, *Towards Computational Epidemiology: Using Stochastic Cellular Automata in Modeling Spread of Diseases*, Proceedings of the 4th Annual International Conference on Statistics, Mathematics and Related Fields, Honolulu, USA, 2005, pp. 1-16.
21. S. H. White, A.M. del Rey, G. R. Sanchez, *Modeling epidemics using cellular automata*, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 186, Issue 1, 2007, pp. 193-202.
22. M. Small, C.K. Tse, *Clustering model for transmission of the SARS virus: application to epidemic control and risk assessment*, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 351, 2005, pp. 499-511.
23. M.J. Keeling, K.T.D. Eames, *Networks and epidemic models*, *J. R. Soc. Interface*, Vol. 2, 2005, pp. 295–307.
24. J.L. Aron I.B. Schwartz, *Seasonality and period-doubling bifurcations in an epidemic model*, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 110, 1984, pp. 665-67.
25. M. Höhle, U. Feldmann, *RLadyBug—An R package for stochastic epidemic models*, *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 52, Issue 2, 2007, pp. 680-686.
26. S. Lloyd, *Integrative Biology - the challenges of developing a collaborative research environment for heart and cancer modelling*, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 23, 2007, pp. 457–465.
27. R. Ahangar, X.-B. Lin, *Multistage evolutionary model for Carciogenesis Mutations*, 5th Mississippi State Conference On Differential Equations and Computational Simulations, Conference 10, 2003, pp. 33-53.
28. K.T. Bogen, *Cell proliferation Kinetics and Multistage Cancer Risk Models*, *Journal of the National Cancer Institute*, Vol.81, No. 4, 1989, pp. 267-277.
29. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: идеи, методы, примеры*. – М.: Физматлит, 2001.
30. Тарасевич Ю.Ю. *Математическое и компьютерное моделирование* / Ю.Ю. Тарасевич – М.: Эдиториал УРСС, 2001.
31. Fu, S. C. (2002). *Modelling epidemic spread using cellular automata*. University of Western Australia.
32. Башабшех М.М., Масленников Б.И., Скворцов, А.В. *Комбинированная имитационная модель пространственного распространения эпидемических заболеваний по холере на основе вероятностного клеточного автомата // Интернет-*

журнал Науковедение. 2013 (3), 47-47.

33. Палюх, Б. В., Егерова, И. А., & Скворцов, А. В. (2012). Сервис моделирования распространения процессов различной природы. Вестник ТвГТУ, 180(20), 11-14.

34. Башабшех, М. М., Скворцов, А. В., & Масленников, Б. И. (2012, December). Совмещение вероятностных клеточных автоматов и компартментных моделей для прогнозной оценки пространственного распространения эпидемиологических заболеваний. In Сб. Трудов НТК. Конференции: «Интеграция науки и образования-производству, экономике (Vol. 12).

35. Bashabsheh M.M., Maslennikov, B.I., Skvorcov A.V. Kombinirovannaja imitacionnaja model'prostranstvennogo rasprostraneniya jepidemicheskikh zabolevanij po holere na osnove verojatnostnogo kletochnogo avtomata. Internet-zhurnal Naukovedenie. 2013 (3), 16.

36. Башабшех М.М., Масленников Б.И. Имитационное моделирование пространственного распространения эпидемий (на примере холеры) с применением метода клеточных автоматов с помощью программы AnyLogic. Интернет-журнал Науковедение. 2013 (6), 127-127.

37. Кручинин, С. В. (2017). Протографы и клеточные автоматы в моделировании динамики распространения состояния в социуме. Научно-исследовательские публикации, (4 (42)), 28-33.

38. Горковенко, Д. К. (2017). Сравнительный анализ моделей эпидемии и клеточного автомата при моделировании распространения информации в социальных сетях. Информатика, телекоммуникации и управление, 10(3), 103-113.

39. Оськин, А. Ф., & Оськин, Д. А. (2021). Моделирование эпидемии с помощью клеточных автоматов. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, (4), 29-34.

40. Бруттан, Ю. В., & Туманова, Е. С. (2020). ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ. Вестник Псковского государственного университета. Серия: Технические науки, (11), 38-48.

41. Иванова, А. Д. (2017). Эвакуационное моделирование на основе клеточных автоматов. Вестник евразийской науки, 9(3 (40)), 13.

42. Соколов, И. А., & Миловидова, А. А. (2017). Обзор свойств клеточных автоматов, их применения. Системный анализ в науке и образовании, (1), 21-31.

43. Кондратьев, М. А. (2013). Методы прогнозирования и модели распространения заболеваний. Компьютерные исследования и моделирование, 5(5), 863-882.

44. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics / W.O. Kermack, A.G. McKendrick // Proc. Roy. Soc. Lond. A 115.1927. С.700-721.

45. Башабшех М.М. Использование среды Anylogic при моделировании распространения эпидемии // Современные научные исследования и инновации (Электронный журнал). 2013. № 4. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2013/04/23264>

46. Dai, J., Zhai, C., Ai, J., Ma, J., Wang, J., & Sun, W. (2020). Modeling the spread of epidemics based on cellular automata. Processes, 9(1), 55.

47. Башабшех, М.М., Масленников, Б.И. Имитационное моделирование пространственного распространения эпидемий (на примере холеры) с применением метода клеточных автоматов с помощью программы AnyLogic // Интернет-журнал «Науковедение». 2013 №6 (19) [Электронный ресурс]. -М. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/135TVN613.pdf>.

48. Bashabshekh M.M., Maslennikov B.I. Simulation modeling of the spatial spread of epidemics (cholera for example) using the method of cellular automata using the Anylogic. Naukovedenie. 2013 (6).

49. Bin, S., Sun, G., & Chen, C. C. (2019). Spread of infectious disease modeling and

- analysis of different factors on spread of infectious disease based on cellular automata. *International journal of environmental research and public health*, 16(23), 4683.
50. Башабшех М.М. Компаратментные модели распространения заболеваний (эпидемии) [Текст] / М.М. Башабшех, Б.И. Масленников и др. // Система гарантий качества образования: Разработка и внедрение: материалы научнопрактической конференции. – Тверь: Купол, 2012. – С.23-27.
51. Athithan, S., Shukla, V. P., & Biradar, S. R. (2014). Dynamic cellular automata based epidemic spread model for population in patches with movement. *Journal of Computational Environmental Sciences*, 2014.
52. Башабшех М. М., Скворцов, А. В., & Масленников, Б. И. (2013). Исследование и прогнозирование эпидемиологических заболеваний на основе компартментальных моделей. Сборник научных трудов магистрантов и аспирантов. Раздел «Информационные технологии в науке и образовании». Тверь: ТвГТУ, (3), 6.
53. Сидляр М. Ю. (2022). Разработка вероятностного клеточного автомата для представления статистических данных по распространению и развитию эпидемий. In Шестая зимняя школа по гуманитарной информатике (pp. 106-111).
54. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Агеева А. Ф. (2020). Моделирование эпидемии COVID-19-преимущества агент-ориентированного подхода. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 13(4), 58-73.
55. Криворотько О. И., Кабанихин С. И. (2023). О математическом моделировании COVID-19. *Сибирские электронные математические известия*, 20(2), 1211-1268.
56. Wolfram S. "Statistical Mechanics of Cellular Automata" / S. Wolfram // *Reviews of modern physics*. 1983. 55, Pages 601-644.
57. Бобков С. П., Галиаскаров Э. Г. (2020). Моделирование процесса теплопроводности с использованием систем клеточных автоматов. *Программные продукты и системы*, 33(4), 641-650.
58. Bashabsheh M.M., Skvorcov A.V., Maslennikov B.I. Sovmeshhenie veroyatnostnyh kletochnyh avtomatov i kompartmentnyh modelej dlja prognoznoj ocenki prostranstvennogo rasprostraneniya jepidemiologicheskikh zabolevanij. Sb. Trudov NTK. Konferencii: «Integracija nauki i obrazovaniya-proizvodstvu, jekonomike, 12.
59. Башабшех М.М., Скворцов А.В., Масленников Б.И. Применение клеточных автоматов для моделирования пространственного распространения эпидемиологических заболеваний // *Вестник тверского государственного технического университета: Научный журнал*. – Тверь: ТвГТУ, 2013. – №1. – Вып.23. – С. 9-14.
60. Mondal, S. Mukherjee S., Bagchi B. (2020). Mathematical modeling and cellular automata simulation of infectious disease dynamics: Applications to the understanding of herd immunity. *The Journal of chemical physics*, 153(11).
61. Башабшех М. М. (2014). Математическое моделирование распространения эпидемий (на примере холеры) с использованием детерминированной и стохастической компартментных моделей. In *Перспективы развития науки и образования* (pp. 15-16).
62. Башабшех М. М., Скворцов, А. В., & Масленников, Б. И. (2013). Исследование пространственно распределенных динамических систем при моделировании распространения эпидемических заболеваний методами вероятностного клеточного автомата. *Перспективы науки*, (5), 60-63.
63. Ghosh S., Bhattacharya S. (2021). Computational model on COVID-19 pandemic using probabilistic cellular automata. *SN Computer Science*, 2(3), 230.
64. Башабшех М. М., Скворцов А. В., & Масленников, Б. И. (2013). Моделирование пространственного распространения эпидемии с использованием регулярных гексагональных решёток на основе вероятностных клеточных автоматов. *Вестник*

ТвГТУ, 84(23,№ 1), 28-32.

65. Yakowitz S., Gani J., Hayes R. (1990). Cellular automaton modeling of epidemics. *Applied mathematics and computation*, 40(1), 41-54.

66. Башабшех М. М., Масленников Б. И., Скворцов А. В. (2015). Программа для прогнозирования пространственно-временного распространения эпидемий с использованием метода клеточного автомата.

67. Quan-Xing L., Zhen J. (2005). Cellular automata modelling of SEIRS. *Chinese Physics*, 14(7), 1370.

68 . Башабшех М.М. Разработка имитационной модели распространения эпидемий на основе вероятностного клеточного автомата. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015 (1), 6-9.

69. Башабшех М. М. (2015). Разработка имитационной модели распространения эпидемий на основе вероятностного клеточного автомата. *Вестник компьютерных и информационных технологий*, (1), 6-9.

70. Башабшех М. М. (2013). Повышение качества и точности противозэпидемической ситуации с применением комбинированной имитационной модели на основе стохастической компартментной модели и клеточного автомата.

71. Dascalu M., Malita M., Barbilian A., Franti E., Stefan G. M. (2020). Enhanced cellular automata with autonomous agents for COVID-19 pandemic modeling. *Rom. J. Inf. Sci. Technol*, 23, S15-S27.

72. Liu Q. X., Jin Z., Liu M. X. (2006). Spatial organization and evolution period of the epidemic model using cellular automata. *Physical Review E*, 74(3), 031110.

73. López L., Burguener G., Giovanini L. L., Baldomenico P. (2013). A cellular automata to model epidemics. In *IV Congreso Argentino de Informática y Salud (CAIS)-JAIIO 42* (2013).

74. Bashabsheh, M. (2025). Reinforcement Learning for Multi-Task Manipulation in Robotic Arm Systems Operating in Dynamic Environments. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 6(5), 2272-2283.

75 . M. M. Alzubi, M. Almseidin, M. Alkasassbeh, M. Bashabsheh, J. Al-Sawwa, and A. S. Mashaleh, "Zero Trust and Predictive Security in Business Intelligence Architectures," *Driving Modern Business Intelligence Architecture for Operational Efficiency*, pp. 327–352, Aug. 2025, doi: 10.4018/979-8-3373-2125-7.ch011.

76. M. M. Alzubi, M. Almseidin, M. Alkasassbeh, M. Bashabsheh, J. Al-Sawwa, and A. S. Mashaleh, "AI-Driven Threat Detection in Business Intelligence Systems," *Strategic AI Integration in Business Intelligence*, pp. 111–134, Sep. 2025, doi: 10.4018/979-8-3373-6801-6.ch005.

# ФИЗИКА, ХИМИЯ

## ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОИМПУЛЬСНЫХ ЛИСТОВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Голубев Владимир Константинович**

Кандидат физико-математических наук, доцент  
Нижний Новгород; Университет Людвиг-Максимилиана, Мюнхен  
Независимый эксперт; приглашенный ученый

**Ключевые слова:** детонационные характеристики; низкоимпульсный листовой взрывчатый материал; тэн; гексоген; пенополиуретан; продукты детонации; уравнение состояния

**Keywords:** detonation characteristics; low-impulse sheet explosive material; PETN; RDX; polyurethane foam; detonation products; equation of state

**Аннотация:** Представлены результаты расчетного изучения детонационных характеристик низкоимпульсных пенополиуретановых листовых взрывчатых материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 на основе тэна и гексогена. В диапазоне плотностей 0.1-0.5 г/см<sup>3</sup> с применением уравнения состояния продуктов детонации ВКВ построены зависимости детонационных характеристик тэна и гексогена от их плотности и детонационных характеристик материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 от их насыпной плотности. Использовалась программа термохимических расчетов Explo5. Рассмотрены такие детонационные характеристики, как скорость, давление, температура и теплота детонации, а также показатель адиабаты продуктов детонации в точке Жуге. Для НИЛ-1 проведено сопоставление с экспериментальными результатами по влиянию насыпной плотности тэна на скорость детонации. Приведены составы продуктов детонации как для тэна и гексогена, так и для рассмотренных взрывчатых материалов на их основе. Для НИЛ-1 и НИЛ-2 приведены параметры уравнения состояния JWL продуктов детонации.

**Abstract:** The article presents the results of a computational study of the detonation characteristics of low-impulse polyurethane foam sheet explosive materials NIL-1 and NIL-2 based on PETN and RDX. In the density range of 0.1-0.5 g/cm<sup>3</sup> the dependences of the detonation characteristics of PETN and RDX on their density and of the detonation characteristics of NIL-1 and NIL-2 on their bulk density were obtained. The Explo5 thermochemical calculation code was used for that. Such detonation characteristics as velocity, pressure, temperature and heat of detonation, and the adiabatic index of detonation products are considered. For NIL-1 a comparison is made with the previously obtained experimental results on the effect of the bulk density of PETN on the detonation velocity. The compositions of the detonation products are given for both PETN and RDX, and for both explosive materials. For NIL-1 and NIL-2 the parameters of the JWL equation of state for the detonation products are presented.

**УДК 662.215.12+662.216.32****Введение**

Промышленный низкоимпульсный листовой взрывчатый материал НИЛ используется для обработки материалов и конструкций энергией взрыва. Он представляет собой листы пенополиуретана с находящимся внутри пор мелкодисперсным порошком тэна или гексогена. Для изготовления этого материала использовался пенополиуретан по ОСТ 6-05-407-75, а условия его изготовления и основные характеристики регламентировались техническими условиями ТУ 84-781-80. Для заполнения каркаса из пенополиуретана используется прежде всего порошок тэна (PETN), показывающий более высокую взрывчатую стабильность при экстремально низких плотностях заполнения. При несколько более высоких плотностях заполнения достаточно стабильно работает также и порошок гексогена (RDX). Для обозначения указанных взрывчатых материалов используется соответствующая нумерация 1 и 2. При изготовлении НИЛ-1 используется порошок тэна с удельной площадью поверхности 1500-8000 см<sup>2</sup>/г.

В качестве основных характеристик листов пенополиуретана используются их толщины, составляющие 5 и 10 мм, и плотности, составляющие 0.02 и 0.04 г/см<sup>3</sup>. Основной исходной характеристикой взрывчатого материала НИЛ-1 является плотность его наполнения порошком взрывчатого материала, то есть эффективная плотность находящегося в порах пенополиуретанового каркаса порошка тэна. В качестве основных значений плотности наполнения используются значения 0.2 и 0.4 г/см<sup>3</sup>. Допускается изготовление листовых взрывчатых материалов и с другими необходимыми характеристиками.

В работе [1] были получены экспериментальные результаты по определению скоростей детонации НИЛ-1 в диапазоне плотностей наполнения 0.1-0.3 г/см<sup>3</sup>, то есть фактически была определена зависимость скорости детонации от плотности наполнения. Было предложено упрощенное уравнение состояния продуктов детонации с линейной зависимостью эффективного показателя адиабаты продуктов детонации от плотности. Проведены расчетные оценки механического воздействия взрыва НИЛ-1 на преграды из нескольких мощных взрывчатых составов. В работе [2] получены экспериментальные результаты по нагружению образцов мощного взрывчатого состава ОТК-90 нормальной и скользящей детонацией образцов материала НИЛ-1. Показан пример использования заряда взрывчатого материала НИЛ-1 при взрывной разборке фрагмента реального боеприпаса.

В данной работе для обоих составов, НИЛ-1 и НИЛ-2, поставлена задача расчетного определения их детонационных характеристик и параметров уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL). С целью сопоставления и последующего использования и анализа поставлена также задача подобного расчетного определения аналогичных характеристик низкоплотных порошков тэна и гексогена. Подобные результаты позволят более эффективно использовать указанные низкоимпульсные листовые взрывчатые материалы для более широких условий взрывных испытаний материалов и конструкций.

## Результаты расчетов

С целью определения детонационных характеристик рассматриваемых низкоимпульсных взрывчатых материалов НИЛ-1 и НИЛ-2, а также уравнений состояния их продуктов детонации проводились расчеты с использованием термохимической компьютерной программы Expro5 [3]. Аналогичные расчеты в целях сопоставления проводились и для входящих в них низкоплотных порошков тэна и гексогена. Используемый подход к проведению подобных расчетов был довольно общим и здесь, чтобы не вдаваться в детали, можно для примера привести работу [4], в которой изучались детонационные характеристики и уравнение состояния продуктов детонации октогена (НМХ). Для расчета детонационных характеристик продуктов детонации использовалось уравнение состояния Беккера-Кистяковского-Уилсона (ВКВ) в его модифицированной форме ВКВN-M. Набор параметров для этой формы уравнения состояния приводится в работе [4], где также использовался набор коволюмов № 2. Параметры уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) определялись на основании полученной в результате аппроксимации расчетной изэнтропии расширения продуктов детонации в форме

$$P = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + C V^{-(1+\omega)}$$

где  $V$  – относительный удельный объем, а  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $\omega$  – подгоночные параметры.

Для проведения термохимических расчетов использовались следующие приведенные в библиотеке программы Expro5 характеристики рассматриваемых веществ, а именно их плотности  $\rho_0$ , химические формулы и стандартные энтальпии образования  $\Delta_f H^\circ_s$ . Для тэна, гексогена и полиуретана плотности, химические формулы и стандартные энтальпии образования имели соответственно следующие значения и выражения: 1.778, 1.80 и 1.05 г/см<sup>3</sup>, C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>N<sub>4</sub>O<sub>12</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>O<sub>6</sub> и C<sub>5.29</sub>H<sub>10</sub>N<sub>0.21</sub>O<sub>1.47</sub>, -533.656, 70.313 и -268.574 кДж/моль.

Полные термохимические и термодинамические расчеты выполнялись для материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 с плотностью наполнения от 0.1 до 0.5 г/см<sup>3</sup> и для тэна и гексогена с плотностью от 0.1 до 0.5 г/см<sup>3</sup>. Указанный для материалов диапазон плотности наполнения соответствует собственно диапазону плотности самих материалов от 0.14 до 0.54 г/см<sup>3</sup>. Полученные детонационные характеристики НИЛ-1 с разной плотностью наполнения представлены в табл. 1, а полученные детонационные характеристики тэна с разной плотностью представлены в табл. 2. Здесь  $D$  – скорость детонации,  $P$  – давление детонации,  $T$  – температура детонации,  $k$  – показатель адиабаты продуктов детонации в точке Жуге,  $Q$  – теплота детонации,  $V_g$  – объем газообразных продуктов детонации.

**Табл. 1. Детонационные характеристики НИЛ-1 с разной плотностью наполнения**

$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$D$ m/s	$P$ GPa	$T$ K	$k$	$Q$ kJ/kg	$V$ dm <sup>3</sup> /kg
0.1	2383.7	0.3016	2351.5	1.638	-2427.9	1300.9
0.2	2899.9	0.7237	3304.5	1.789	-3683.9	1131.2
0.3	3267.5	1.2254	3702.4	1.962	-4252.6	1050.3
0.4	3621.6	1.8301	3898.9	2.153	-4574.9	1005.7
0.5	3981.6	2.6267	4021.6	2.259	-4790.0	976.92

**Табл. 2. Детонационные характеристики тэна с разной плотностью**

$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$D$ m/s	$P$ GPa	$T$ K	$k$	$Q$ kJ/kg	$V$ dm <sup>3</sup> /kg
0.1	2446.9	0.2554	4209.2	1.344	-4594.5	906.38
0.2	2728.5	0.5762	4309.9	1.584	-4829.1	895.92
0.3	3044.5	0.9947	4371.8	1.795	-4996.6	888.52
0.4	3381.7	1.5271	4413.9	1.995	-5140.6	882.17
0.5	3733.6	2.2000	4445.3	2.168	-5269.9	876.42

Полученные таким же образом детонационные характеристики НИЛ-2 с разной плотностью наполнения и детонационные характеристики гексогена с разной плотностью представлены в табл. 3, 4.

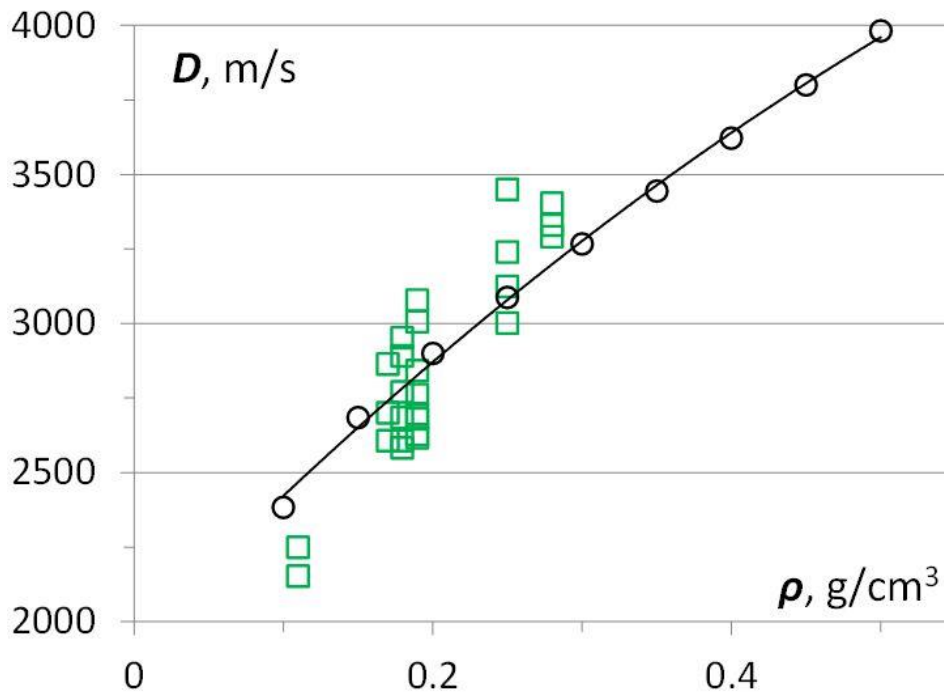
**Табл. 3. Детонационные характеристики НИЛ-2 с разной плотностью наполнения**

$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$D$ m/s	$P$ GPa	$T$ K	$k$	$Q$ kJ/kg	$V$ dm <sup>3</sup> /kg
0.1	2403.8	0.3086	2351.3	1.621	-2487.5	1309.9
0.2	2908.6	0.6981	2768.0	1.909	-2999.2	1274.8
0.3	3411.9	1.3103	3485.9	2.021	-3906.4	1164.4
0.4	3813.2	2.0008	3677.8	2.198	-4203.1	1123.3
0.5	4212.5	2.8896	3790.2	2.316	-4397.6	1095.7

**Табл. 4. Детонационные характеристики гексогена с разной плотностью**

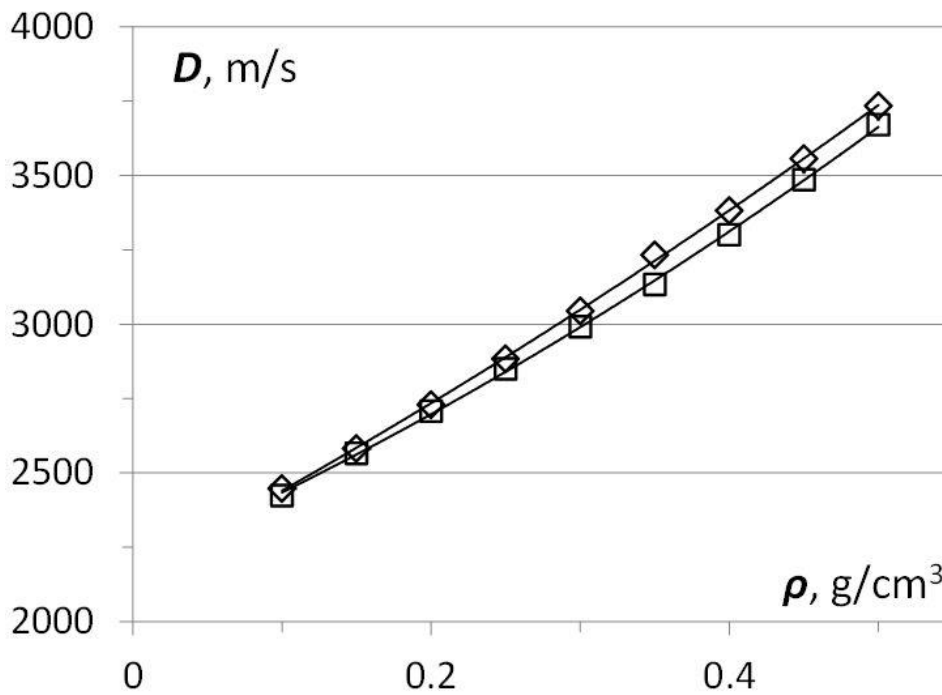
$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$D$ m/s	$P$ GPa	$T$ K	$k$	$Q$ kJ/kg	$V$ dm <sup>3</sup> /kg
0.1	2639.7	0.2925	4332.7	1.382	-4651.1	1019.8
0.2	2940.7	0.6570	4395.3	1.632	-4833.2	1011.0
0.3	3279.8	1.1284	4419.5	1.860	-4951.7	1005.1
0.4	3641.9	1.7370	4425.6	2.054	-5041.8	1000.4
0.5	4019.4	2.5004	4415.1	2.231	-5113.1	996.38

Результаты расчетов скорости детонации НИЛ-1 в зависимости от плотности наполнения тэна могут быть сопоставлены с результатами выполненных ранее в работе [1] экспериментов. Результаты такого сопоставления показаны на рис. 1. Естественный разброс экспериментальных результатов, связанный с определенной сложностью процесса наполнения и неидеальностью процесса детонации в такого рода неоднородной гетерогенной системе, тем не менее достаточно хорошо согласуется с полученной расчетной зависимостью влияния плотности наполнения взрывчатого материала на скорость детонации. Эта тенденция может быть аппроксимирована квадратичной зависимостью скорости детонации от плотности  $D = 1930.3 + 5131.4 \rho - 2141.4 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9979$  с соответствующим коэффициентом детерминации.



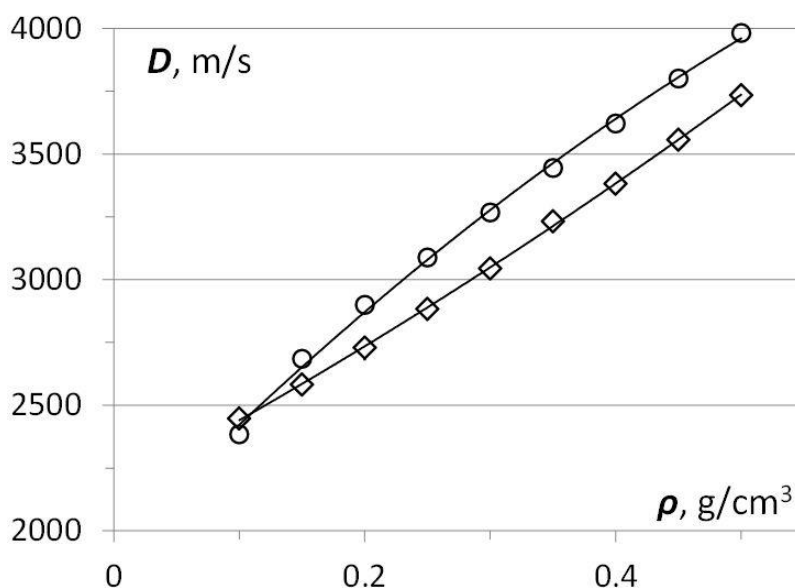
**Рис. 1. Влияние плотности наполнения тэна на скорость детонации НИЛ-1 по результатам проведенных расчетов (кружки) и выполненных в работе [1] экспериментов (квадраты).**

В работе [5] были получены экспериментальные результаты по влиянию плотности на скорость детонации тэна, в том числе и в области низких плотностей. Эти результаты были представлены в указанной работе двумя следующими зависимостями скорости детонации от плотности:  $D = 2.14 + 2.84 \rho$  км/с,  $\rho < 0.37$  г/см³, и  $D = 3.19 + 3.70 (\rho - 0.37)$  км/с,  $0.37$  г/см³  $< \rho$ . Сопоставление этих экспериментальных результатов с полученными в данной работе расчетными результатами выполнено на рис. 2. Полученные таким образом результаты могут быть аппроксимированы квадратичными зависимостями скорости детонации от плотности для экспериментов  $D = 2200.3 + 2193.7 \rho + 1164.9 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9995$  и для расчетов  $D = 1930.3 + 5131.4 \rho - 2141.4 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9979$ .

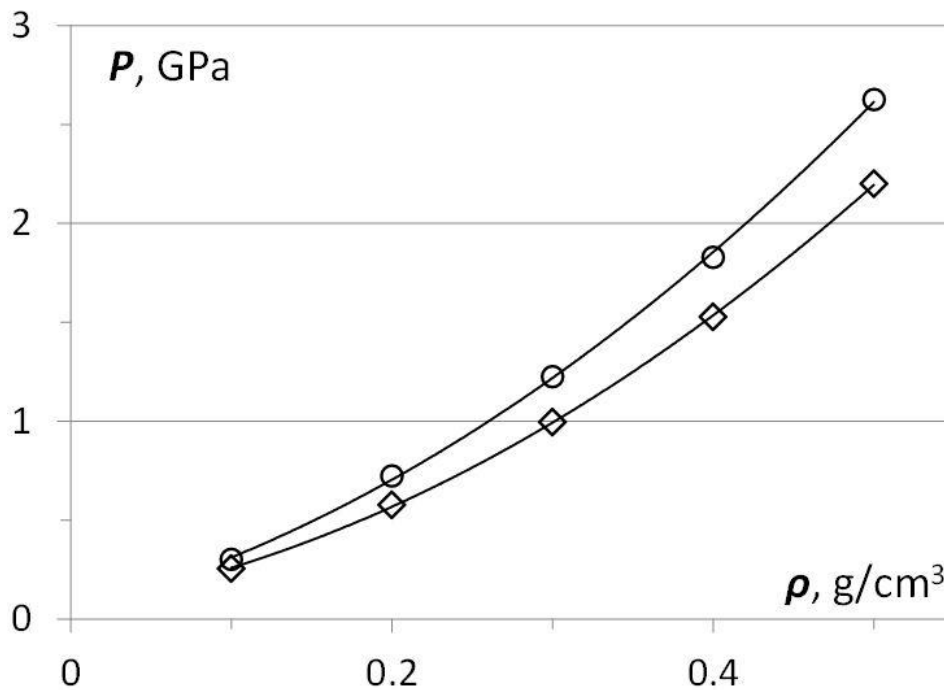


**Рис. 2. Влияние плотности тэна на скорость детонации по результатам экспериментов (квадраты) и расчетов (ромбы).**

Сопоставительные результаты по влиянию плотности наполнения на скорость детонации НИЛ-1 и по влиянию плотности на скорость детонации тэна показаны на рис. 3. Аналогичные сопоставительные результаты по влиянию на давление детонации показаны на рис. 4. Аппроксимирующие квадратичные зависимости скорости детонации и давления детонации от плотности, приведенные на рис. 3, 4, могут быть представлены в виде  $D = 1930.3 + 5131.4 \rho - 2141.4 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9979$  (НИЛ-1) и  $D = 2165.8 + 2646.1 \rho + 991.91 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9997$  (тэн), и  $P = 0.0405 + 2.1052 \rho + 6.0857 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9996$  (НИЛ-1) и  $P = 0.0677 + 1.3340 \rho + 5.8436 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9999$  (тэн).

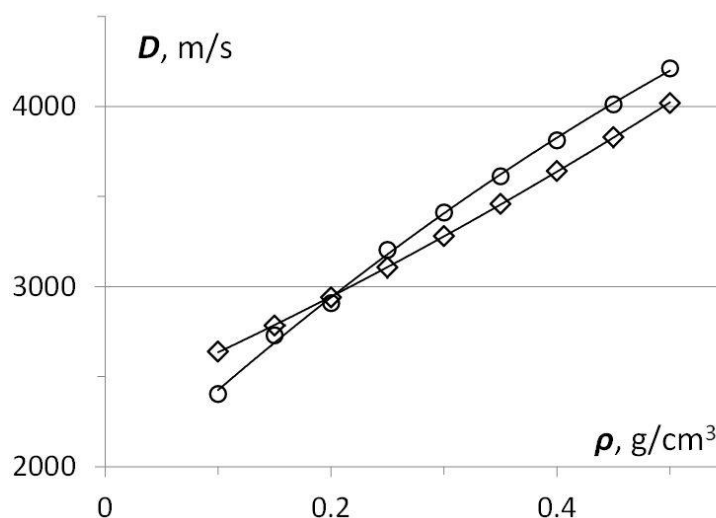


**Рис. 3. Влияние плотности наполнения НИЛ-1 и плотности тэна на скорость детонации НИЛ-1 (кружки) и тэна (ромбы).**

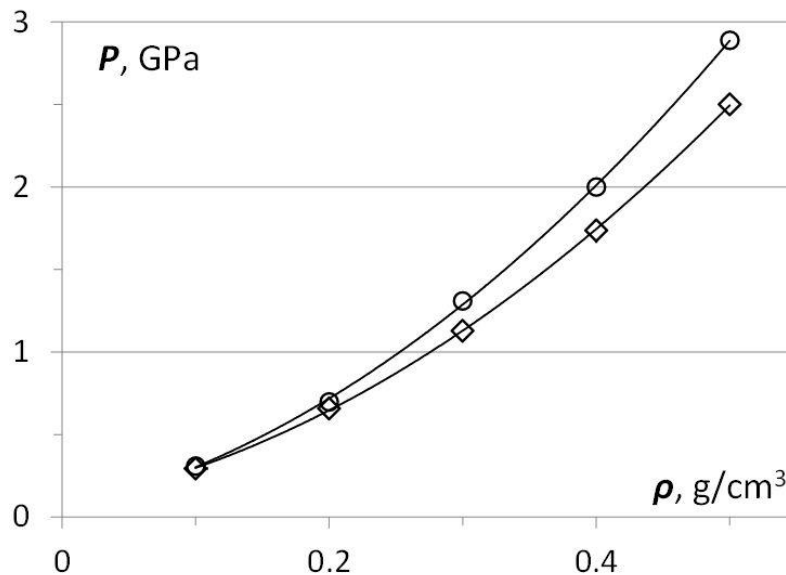


**Рис. 4. Влияние плотности наполнения НИЛ-1 и плотности тэна на давление детонации НИЛ-1 (кружки) и тэна (ромбы).**

Сопоставительные результаты по влиянию плотности наполнения на скорость детонации НИЛ-2 и по влиянию плотности на скорость детонации гексогена показаны на рис. 5. Аналогичные сопоставительные результаты по влиянию на давление детонации показаны на рис. 6. Аппроксимирующие квадратичные зависимости скорости детонации и давления детонации от плотности, приведенные на рис. 5, 6, могут быть представлены в виде  $D = 1864.2 + 5853.6 \rho - 2366.5 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9985$  (НИЛ-2) и  $D = 2350.8 + 2720.1 \rho + 1248.7 \rho^2$ ,  $R^2 = 1.0000$  (гексоген), и  $P = 0.0405 + 1.8494 \rho + 7.6921 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9996$  (НИЛ-2) и  $P = 0.0818 + 1.4887 \rho + 6.6786 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9999$  (гексоген).

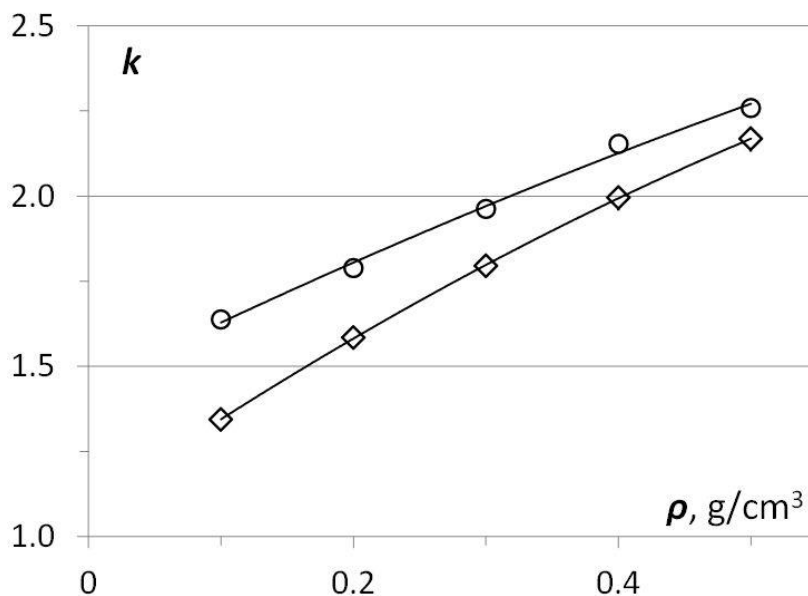


**Рис. 5. Влияние плотности наполнения НИЛ-2 и плотности гексогена на скорость детонации НИЛ-2 (кружки) и гексогена (ромбы).**

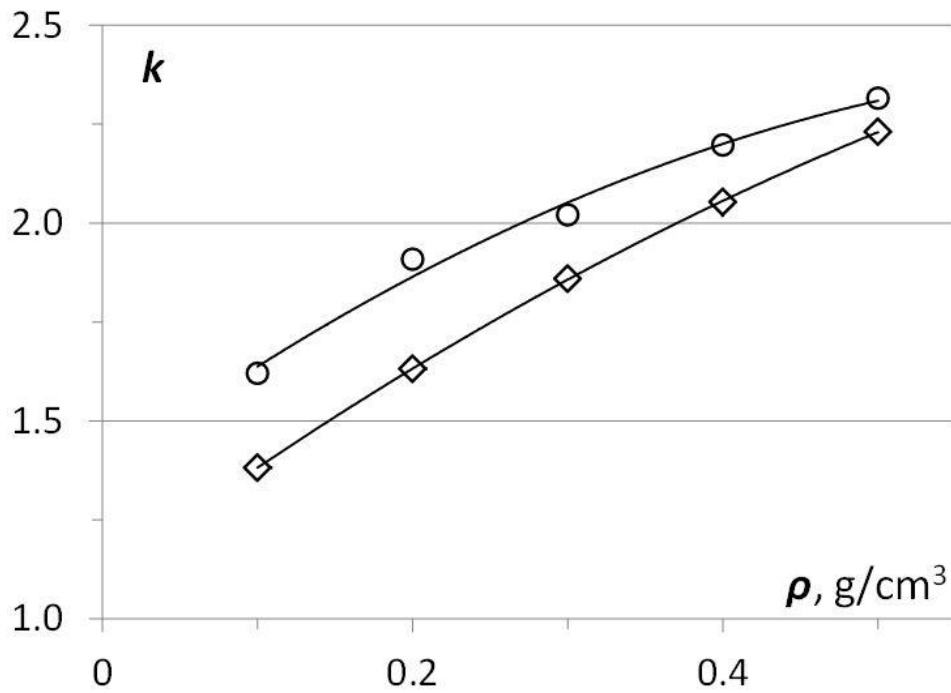


**Рис. 6.** Влияние плотности наполнения НИЛ-2 и плотности гексогена на давление детонации НИЛ-2 (кружки) и гексогена (ромбы).

Сопоставительные результаты по влиянию плотности наполнения на показатель адиабаты продуктов детонации НИЛ-1 и по влиянию плотности на показатель адиабаты продуктов детонации тэна показаны на рис. 7. Сопоставительные результаты по влиянию плотности наполнения на показатель адиабаты продуктов детонации НИЛ-2 и по влиянию плотности на показатель адиабаты продуктов детонации гексогена показаны на рис. 8. Аппроксимирующие квадратичные зависимости показателя политропы от плотности, приведенные на рис. 7, 8, могут быть представлены в виде  $k = 1.4424 + 1.9146 \rho - 0.5143 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9951$  (НИЛ-1) и  $k = 1.0870 + 2.6804 \rho - 1.0357 \rho^2$ ,  $R^2 = 1.0000$  (тэн), и  $k = 1.3718 + 2.8576 \rho - 1.9643 \rho^2$ ,  $R^2 = 0.9887$  (НИЛ-2) и  $k = 1.1058 + 2.8914 \rho - 1.2857 \rho^2$ ,  $R^2 = 1.0000$  (гексоген).



**Рис. 7.** Влияние плотности наполнения НИЛ-1 и плотности тэна на показатель адиабаты продуктов детонации в точке Жуге НИЛ-1 (кружки) и тэна (ромбы).



**Рис. 8. Влияние плотности наполнения НИЛ-2 и плотности гексогена на показатель адиабаты продуктов детонации в точке Жуге НИЛ-2 (кружки) и гексогена (ромбы).**

В табл. 5, 6 приведен состав продуктов детонации НИЛ-1 и тэна в точке Жуге для различных исходных плотностей тэна при расчете с использованием уравнения состояния продуктов детонации ВКWN-M.

**Табл. 5. Состав продуктов детонации в точке Жуге для НИЛ-1 с разной плотностью наполнения**

ρ, g/cm <sup>3</sup>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Products	Mol %				
CO	46.4287	42.3896	38.8385	36.0060	33.7788
H <sub>2</sub> O	32.7144	21.1337	26.7931	29.5721	31.1792
H <sub>2</sub>	8.8663	19.2572	12.3897	8.8829	6.8126
N <sub>2</sub>	8.5829	11.6719	13.1927	14.1139	14.7416
CO <sub>2</sub>	1.9014	4.9856	7.9678	10.4480	12.4379
CH <sub>4</sub>	1.0534	0.0174	0.0042	0.0022	0.0017
NH <sub>3</sub>	0.2187	0.1214	0.0908	0.0783	0.0752
HCN	0.1660	0.0781	0.0540	0.0443	0.0414
CH <sub>2</sub> O	0.0268	0.0256	0.0202	0.0160	0.0129
H	0.0140	0.2046	0.3074	0.3032	0.2633
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0078	0.0414	0.0825	0.1280	0.1884
OH	0.0005	0.0647	0.2092	0.2999	0.3167

**Табл. 6. Состав продуктов детонации в точке Жуге для тэна с разной плотностью**

$\rho, \text{g/cm}^3$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Products	Mol %				
H <sub>2</sub> O	28.4509	29.1053	30.5167	31.2862	31.9763
CO	22.1745	21.7195	20.7775	20.2530	24.2671
CO <sub>2</sub>	20.4856	21.2125	22.7040	23.5174	19.7591
N <sub>2</sub>	16.0357	16.1837	16.5326	16.7463	16.9545
OH	4.2045	3.7823	2.7948	2.2461	1.7630
H <sub>2</sub>	3.1477	2.9816	2.6020	2.3791	2.1656
NO	2.0497	1.9744	1.7320	1.5522	1.3633
O <sub>2</sub>	1.9454	1.7407	1.3656	1.1769	1.0051
H	0.8421	0.7174	0.5019	0.4049	0.3257
O	0.6333	0.5419	0.3991	0.3374	0.2859
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0127	0.0197	0.0458	0.0692	0.1002
NO <sub>2</sub>	0.0081	0.0090	0.0106	0.0109	0.0109

В табл. 7, 8 приведен состав продуктов детонации НИЛ-2 и гексогена в точке Жуге для различных исходных плотностей гексогена при расчете с использованием уравнения состояния продуктов детонации ВКWN-М.

**Табл. 7. Состав продуктов детонации в точке Жуге для НИЛ-2 с разной плотностью наполнения**

$\rho, \text{g/cm}^3$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Products	Mol %				
CO	40.6588	39.0534	35.4854	34.0291	33.0168
H <sub>2</sub>	33.3838	31.4916	22.4951	18.7322	16.1174
N <sub>2</sub>	18.0004	20.3297	24.9407	26.5726	27.6699
CH <sub>4</sub>	3.8208	1.0506	0.0780	0.0611	0.0661
H <sub>2</sub> O	2.2961	5.9227	13.8296	16.7721	18.7902
HCN	0.8141	0.6514	0.3370	0.3347	0.3682
CO <sub>2</sub>	0.4360	0.9046	2.1052	2.6592	3.0490
NH <sub>3</sub>	0.3275	0.4496	0.3540	0.3867	0.4440
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.1847	0.0399	0.0016	0.0014	0.0018
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.0364	0.0056	0.0001	0.0001	0.0001
CH <sub>2</sub> O	0.0243	0.0346	0.0325	0.0300	0.0270
H	0.0140	0.0525	0.2498	0.2702	0.2470

**Табл. 8. Состав продуктов детонации в точке Жуге для гексогена с разной плотностью**

$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Products	Mol %				
N <sub>2</sub>	31.8696	32.2426	32.5017	32.7094	32.8830
CO	25.7455	25.7247	25.7455	25.7969	25.8711
H <sub>2</sub> O	21.8282	22.9037	23.6852	24.3396	24.9089
H <sub>2</sub>	8.5817	8.2642	7.9662	7.6643	7.3529
CO <sub>2</sub>	6.6162	6.8882	7.0237	7.0838	7.0879
OH	2.2927	1.6675	1.2248	0.8794	0.6074
H	1.5689	1.1386	0.8810	0.6893	0.5343
NO	1.0032	0.7917	0.6253	0.4832	0.3600
O	0.2366	0.1489	0.1044	0.0749	0.0529
O <sub>2</sub>	0.2032	0.1292	0.0885	0.0607	0.0404
NH <sub>3</sub>	0.0180	0.0354	0.0546	0.0775	0.1055
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0132	0.0294	0.0499	0.0772	0.1142

Подобные сопоставительные результаты позволяют прояснить тенденции влияния плотности на характер детонации рассмотренных составов, а также, наряду с полученными и приведенными выше детонационными характеристиками, выявить явное влияние полиуретанового каркаса на характер детонации мелкодисперсных порошков чистых взрывчатых веществ.

Полученные в расчетах с использованием уравнения состояния BKWN-M параметры уравнения состояния JWL продуктов детонации материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 для двух плотностей заполнения тэном и гексогеном приведены в табл. 9. Эти данные могут непосредственно использоваться при проведении газодинамических расчетов систем, включающих указанные материалы.

**Табл. 9. Параметры уравнения состояния JWL продуктов детонации материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 для двух плотностей заполнения**

Material; $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	НИЛ-1		НИЛ-2	
	0.2	0.4	0.2	0.4
<i>A</i> , GPa	9.55134	27.6153	35.4354	29.8174
<i>B</i> , GPa	0.600720	1.16848	1.66487	1.16684
<i>C</i> , GPa	0.282711	0.561595	0.266984	0.531210
<i>R</i> <sub>1</sub>	6.98355	5.67429	9.81549	5.37681
<i>R</i> <sub>2</sub>	2.49420	1.78324	3.31150	1.55050
$\omega$	0.256475	0.263203	0.251263	0.268709
<i>D</i> , m/s	2899.9	3621.6	2908.6	3813.2
<i>Q</i> , kJ/kg	-3683.9	-4574.9	-2999.2	-4203.1
<i>P</i> , GPa	0.7237	1.8301	0.6981	2.0008

## Заключение

Проведено расчетное исследование детонационных характеристик листовых взрывчатых материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 на основе порошков тэна и гексогена,

размещенных в каркасе из низкоплотного пенополиуретана. Диапазон рассмотренных плотностей указанных взрывчатых веществ составлял 0.1 - 0.5 г/см<sup>3</sup>. В качестве основы для данного изучения явились некоторые полученные ранее экспериментальные результаты по изучению свойств материалов НИЛ и по их использованию при отработке ряда взрывных технологических операций, часть из которых упоминается в работе. Для выполнения задуманной работы использовалась комплексная программа термохимических расчетов Explo5, хорошо зарекомендовавшая себя на большом числе выполненных термохимических и термодинамических исследований различных взрывчатых материалов. Приемлемая степень точности расчетной методики подтверждается хорошим согласием расчетных результатов определения детонационных характеристик тэна в этом диапазоне плотностей с подобными экспериментальными результатами.

Для НИЛ-1 в рассмотренном диапазоне плотностей тэна основные детонационные характеристики, скорость и давление детонации, несколько превышают таковые для чистого тэна за исключением точки минимальной плотности 0.1 г/см<sup>3</sup>. В то же время для НИЛ-2 наблюдается определенная особенность для зависимости скорости детонации от плотности гексогена. Здесь при подобном ходе зависимостей совпадение значений скорости наблюдается для точки плотности 0.2 г/см<sup>3</sup>. Для анализа этих зависимостей требуется более детальный физико-химический анализ процессов детонации. С целью проведения в дальнейшем такого анализа для всех случаев определения детонационных характеристик были также определены составы продуктов детонации как материалов НИЛ-1 и НИЛ-2, так и непосредственно тэна и гексогена.

Для обоих материалов, НИЛ-1 и НИЛ-2, и для собственно тэна и гексогена увеличение плотности взрывчатых веществ приводит к увеличению показателя адиабаты продуктов детонации в точке Жуге. При этом значения этого показателя во всех случаях имеют большие значения для взрывчатых материалов по сравнению со значениями для чистых взрывчатых веществ. В результате выполненных расчетов для материалов НИЛ-1 и НИЛ-2 получены также параметры уравнения состояния JWL, которые могут быть использованы при проведении газодинамических расчетов.

#### Литература:

1. Голубев В.К., Медведкин В.А. О нагружении преград взрывом низкоплотного листового взрывчатого вещества. // ПМТФ. – 2000. – Т. 41, № 3. – С. 43-47.
2. Голубев В.К., Медведкин В.А., Погорелов А.П. Скоков В.И. Предельная стойкость взрывчатого состава на основе октогена при ударно-волновом нагружении. // ФГВ. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 114-119.
3. Sućeska M. Explo5. Version 6.06 User's Guide. – Zagreb, Croatia, 2021. – 197 p.
4. Голубев В.К. Уравнение состояния продуктов детонации октогена из эксперимента и из термохимического расчета. [Электронный ресурс] // Sci-article.ru. 2023. – URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1698871889> (дата обращения: 03.11.2023).
5. Hornig H.C., Lee E.L., Finger M., Kurrle K.E. Equation of state of detonation products. // Proc. 5th Symp. (Int.) on Detonation. – Office of Naval Research, Washington, DC, ACR-184. – 1970. – P 503-512.

# ФИЗИКА, ХИМИЯ

## МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ХИМИИ И ФИЗИКИ: ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ «RELEON».

*Манин Константин Владимирович*

к.б.н.

ГАНОУ СО "Губернаторский лицей"

учитель биологии и химии, кафедры естественно-научных дисциплин (КЕНД)

*Саранцев А. В., учитель физики, ГАНОУ СО «Губернаторский лицей»*

**Ключевые слова:** цифровая лаборатория «Releon»; междисциплинарные связи; химия; физика; оптическая плотность; электрическая проводимость

**Keywords:** Releon digital laboratory; interdisciplinary connections; chemistry; physics; optical density; electrical conductivity

**Аннотация:** В статье рассматривается опыт совместного использования цифровой лаборатории Releon на уроках химии и физики с целью формирования междисциплинарных связей и углубления знаний учащихся. Представлен пример использования датчиков Releon для изучения оптической плотности (химия) и электрической проводимости (физика). Подчеркивается, что применение цифровых лабораторий позволяет наглядно демонстрировать взаимосвязь между различными физическими и химическими явлениями, способствуя лучшему усвоению материала и развитию исследовательских навыков. Акцент делается на возможности использования одного и того же оборудования для изучения, казалось бы, различных свойств веществ, тем самым демонстрируя единство научного знания.

**Abstract:** The article examines the experience of sharing the Releon digital laboratory in chemistry and physics lessons in order to form interdisciplinary connections and deepen students' knowledge. An example of using Releon sensors to study optical density (chemistry) and electrical conductivity (physics) is presented. It is emphasized that the use of digital laboratories makes it possible to clearly demonstrate the relationship between various physical and chemical phenomena, contributing to better assimilation of the material and the development of research skills. The emphasis is on the possibility of using the same equipment to study seemingly different properties of substances, thereby demonstrating the unity of scientific knowledge.

УДК 004.9:535.651+544.354

### Введение

В современном образовании, когда объем информации стремительно растет, особенно актуальным становится формирование у учащихся не просто суммы

знаний, а целостного представления о мире, понимания взаимосвязи явлений и умения применять полученные знания на практике. Одним из путей достижения этой цели является интеграция различных учебных дисциплин, установление междисциплинарных связей, которые позволяют увидеть изучаемые предметы с разных сторон и глубже понять их суть.

Цифровые лаборатории, как современный инструмент обучения, предоставляют уникальные возможности для реализации междисциплинарного подхода. Они позволяют проводить наглядные эксперименты, собирать данные и анализировать результаты, а также моделировать различные процессы, что делает обучение более интерактивным и увлекательным [1].

Использование цифровых лабораторий особенно эффективно на различных этапах формирования понятий. Опираясь на описание Н.В. Залесовой [2], можно выделить три этапа в формировании и развитии понятий:

I этап – накопление, развитие опорных знаний (фактов соподчиненных понятий) как основных элементов содержания определяемого понятия; II этап – интеграция (синтез) элементов содержания и определение (выведение) на этой основе понятия; III этап – использование сформированного понятия как целостного знания по пути закрепления и дальнейшего развития (углубления, расширения, взаимослияния с другими и т.д.).

Понятия постоянно развиваются, расширяются и углубляются, и цифровые лаборатории могут эффективно применяться на каждом из этих этапов, обеспечивая наглядность и практическую значимость обучения.

В данной статье мы рассмотрим опыт совместного использования цифровой лаборатории Releon учителями химии и физики для изучения оптической плотности и электрической проводимости. Мы покажем, как использование одних и тех же датчиков Releon позволяет продемонстрировать связь между этими, казалось бы, разными понятиями, углубить знания учащихся, развить их исследовательские навыки и, что особенно важно, подчеркнуть единство научного знания.

Иногда доступных датчиков может оказаться недостаточно для проведения всех запланированных экспериментов по конкретному предмету. Это может быть связано со спецификой измерений, техническими особенностями датчиков или другими факторами. В таких случаях появляется возможность использовать датчики из цифровой лаборатории по другому предмету, демонстрируя тем самым универсальность оборудования и укрепляя междисциплинарные связи. Этот подход показывает учащимся, что научные инструменты и методы могут применяться в разных областях знания, и что понимание принципов работы этих инструментов способствует более глубокому пониманию мира вокруг нас.

В качестве примера такой интеграции мы рассмотрим использование датчика проводимости из химической лаборатории Releon для изучения электропроводности растворов на уроках физики, а также демонстрацию измерения оптической плотности на уроках химии, что позволяет учащимся в дальнейшем, при изучении соответствующих тем по физике, увидеть практическое применение изученных концепций.

## Оптическая плотность (Химия)

Цифровые лаборатории «Releon» подходят как для базового уровня изучения естественных наук, так и для профильного обучения. Могут применяться для любых типов занятий и возрастных групп: от начальной школы (к примеру, использование датчика расстояния при знакомстве с линейкой) и заканчивая старшей школой (работая с осциллографом из комплекта для регистрации и изучения электрических сигналов).

Датчики из комплектов позволят заменить или не использовать часть устаревшего оборудования. Или, наоборот, задействовать старое для построения новых экспериментов. В нашем случае мы использовали датчик оптической плотности (калориметр) для наших экспериментов.

Перед началом работы необходимо установить программное обеспечение Releon Lite для своей операционной системы с сайта производителя из раздела «Поддержка» [3]. Методики экспериментов и детальное описание датчиков прилагается к набору цифровой лаборатории.

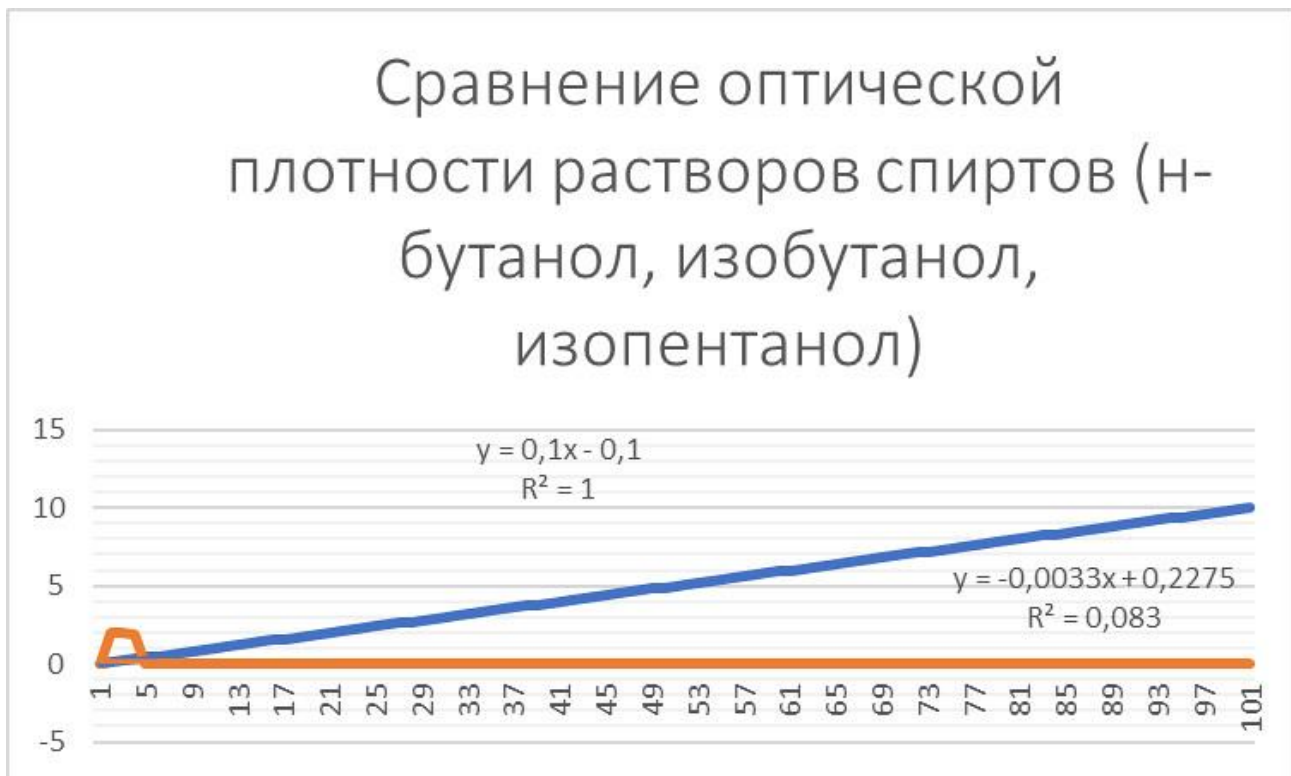
В данном исследовании применялся датчики оптической плотности (калориметр) для регистрации изменений спектральной проницаемости растворов «Галогеналканов» и «Спиртов» [4;5]. На эту мысль меня натолкнуло детальное изучение методики экспериментов для цифровой лаборатории и желание проверить некоторые гипотезы.

При спектрофотометрическом определении многих биохимических показателей, величина эффекта будет зависеть не только от дозы (длины волны или интенсивности излучения), но также от вида используемого реактива [6; 7; 8; 9; 10]. На примере фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) показано, что содержание данных компонентов в опытном растворе зависит от вида растворителя, его способности извлекать исследуемые пигменты и длины используемой волны [6; 11]. Полученные с помощью данного реактива молярные коэффициенты экстинкции позволяет минимизировать данную разницу значений, которая зависит от вида растворителя, его способности извлекать исследуемые пигменты и длины используемой волны [11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На данном этапе применения цифровой лаборатории использовался датчик оптической плотности для регистрации изменений спектральной проницаемости растворов «Галогеналканов» и «Спиртов». Полученные результаты были представлены ранее в предыдущей публикации [12].

В данной публикации были изображены пики оптической плотности полученные при измерении следующих растворов: контроль — дистиллированная вода (первый пик) и опытные образцы гексан, дихлорметан, трихлорметан и четырёххлористый углерод (последующие пики). Как видно из полученных данных ширина полосы зависела от количества атомов водорода замещённых на галоген. На данных эксперимент натолкнули размышления об осуществлении опыта радикального бромирования алканов (Лабораторная работа №19). Дистиллированная вода использовалась в качестве «холостой пробы».



**Рисунок 1. Сравнение оптической плотности растворов спиртов (н-бутанол, изобутанол, изопентанол).**

На рисунке 1 изображены значения оптической плотности полученные при измерении следующих растворов: контроль — дистиллированная вода (красный график) и опытные образцы н-бутанол, изобутанол, изопентанол (синий график). Как видно из полученных данных оптическая плотность всех спиртов была на одном уровне по сравнению с Галогеналканами. Возможно, это связано с тем, что спирты являются хорошими растворителями для органических соединений. Кроме того, как было сказано ранее спирты позволяют полностью извлекать исследуемые соединения из растительного сырья по сравнению с ацетоном [6]. На данных эксперимент натолкнули размышления об осуществлении опыта окисления спиртов (Лабораторная работа №30). Дистиллированная вода использовалась в качестве «холостой пробы».

Для уроков физики это заклад знаний дает расширение и углубление практических представлений о оптической плотности в 11 классе при изучении этой темой по физике в расширенном курсе, а так напоминание материала, а также возможности воочию увидеть, что есть устройства способные это измерить. Это особенно важно, так как способствует визуализации абстрактных понятий.

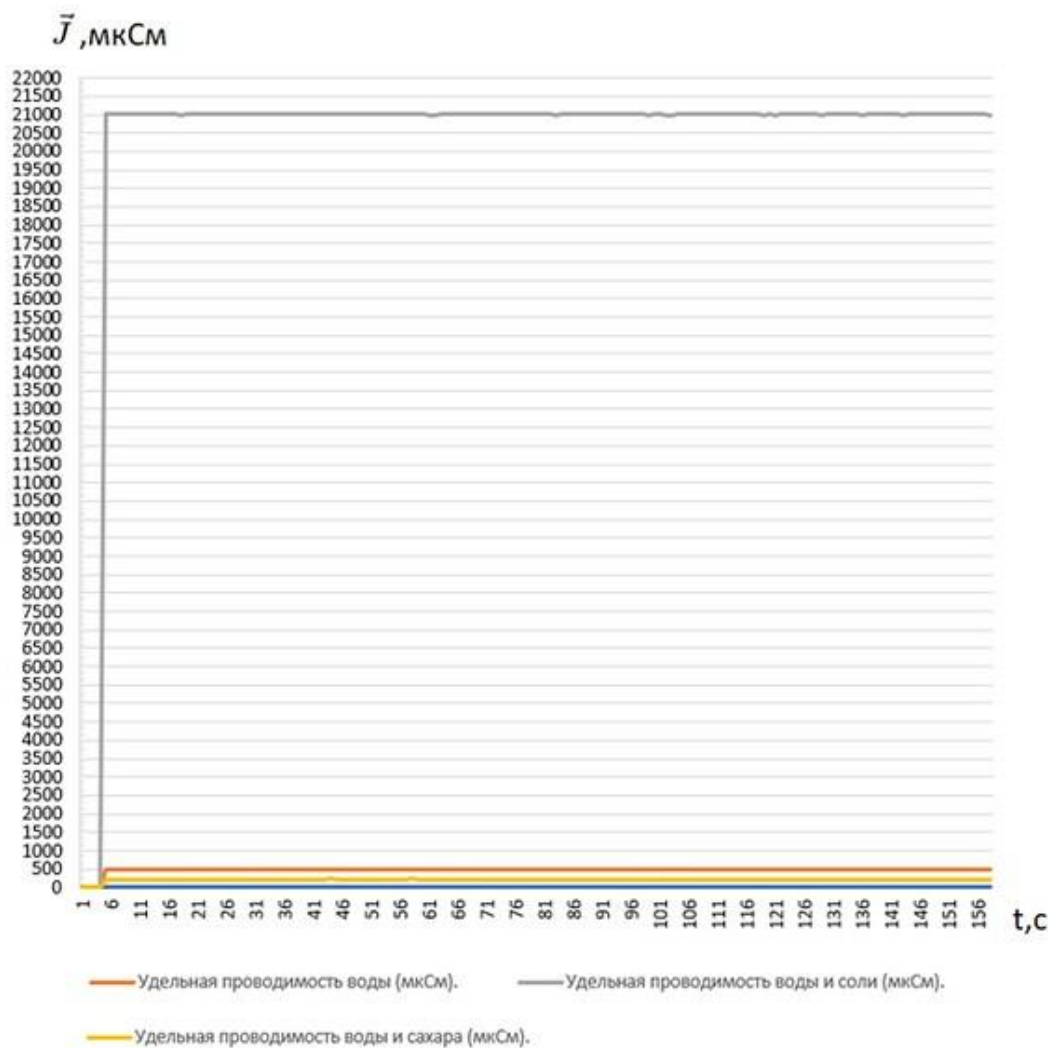
Тема "Электрический ток в различных средах", освещаемая в 8 классе, представляет собой основополагающий раздел физики, имеющий критическое значение для понимания электрических явлений и процессов. Ключевым концептом данной области является **электропроводность**, что можно определить как способность вещества проводить электрический ток. Для количественной характеристики электропроводности используется параметр, известный как **удельная электропроводность**, которая показывает, сколько тока может протекать через единичный участок поперечного сечения при установлении

единичного градиента электрического потенциала. Разные среды обладают неодинаковой электропроводностью в зависимости от их атомной структуры и наличия свободных носителей заряда.

В рамках нашего исследования особое внимание уделяется **жидким средам**. Эти среды, отличающиеся от твердых проводников, где основными носителями заряда выступают электроны, основывают свою электропроводимость на движении ионов – положительно и отрицательно заряженных частиц. Существуют разные типы электролитов, такие как кислоты, соли и основания. Они обеспечивают проводимость через свободные ионы, которые образуются в результате их диссоциации в растворе.

Традиционно, для демонстрации особенностей электрической проводимости в различных средах используются демонстрационные эксперименты [13]. Однако, подготовка таких экспериментов сопряжена со значительными временными затратами и техническими сложностями, что ограничивает возможности проведения практических занятий и индивидуальной работы учащихся. В связи с этим, эффективным решением представляется использование цифровых лабораторий, в частности, цифровой лаборатории Releon по химии, предлагающей многофункциональный датчик для измерения электропроводности растворов в микросименсах (мкСм). Использование данного датчика позволяет заменить сложную экспериментальную установку и визуализировать результаты измерений в режиме реального времени, повышая наглядность эксперимента, сокращая время на подготовку, обеспечивая точность измерений и развивая исследовательские навыки учащихся.

Осуществляя эксперимент, мы изучили зависимость удельной электропроводности от времени для водных растворов. В качестве объектов исследования использовались: **вода**, раствор воды и поваренной соли и раствор воды и сахара.



**Рисунок 2. Исследование зависимости удельной электропроводности от времени для водных растворов.**

В результате проведенных опытов был составлен график зависимости удельной электропроводности от времени, в который включены три образца: обычная вода, раствор соли и раствор сахара. Значимость этого эксперимента заключается в наглядной демонстрации диапазонов электропроводности. Водопроводная вода показала электропроводность в пределах 480-510 мкСм, что объясняется наличием в ней свободных ионов, способных проводить электрический ток. При добавлении сахара в воду наблюдается незначительное изменение электропроводности, которая остается на уровне 217-228 мкСм. Это связано с тем, что сахар не является электролитом и не диссоциирует на ионы, не увеличивая тем самым количество свободных носителей заряда. В то время как раствор поваренной соли существенно повышает электропроводность до значений 20995-21010 мкСм благодаря диссоциации соли на ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ) и хлора ( $\text{Cl}^-$ ).

Таким образом, значительное повышение электропроводности растворов в результате увеличения концентрации ионов подтверждает физические принципы, согласно которым чем больше свободных носителей заряда в среде, тем выше её проводимость.

Важно отметить, что знакомство учащихся с современным оборудованием, таким как цифровая лаборатория Releon, и полученные результаты экспериментов закладывают основы их знаний, которые будут полезны в дальнейшем процессе обучения, в том числе на уроках химии в 9 классе. Это предоставит им начальное представление о таких ключевых понятиях, как электрическая диссоциация, что существенно облегчит понимание более сложных тем в дальнейшем [14].

## **Заключение**

Применение цифровой лаборатории Releon в образовательном процессе представляет собой эффективный подход к реализации междисциплинарной интеграции и формированию глубоких, прочных знаний у учащихся. Использование одного и того же оборудования, в частности, датчика проводимости из химической лаборатории Releon, как на уроках физики для демонстрации основ электрической проводимости в различных средах, так и на уроках химии для изучения электролитической диссоциации и влияния природы вещества на электропроводность растворов, позволяет достичь нескольких важных образовательных целей.

Во-первых, это способствует повышению наглядности обучения и развитию исследовательских навыков, позволяя учащимся самостоятельно проводить эксперименты, варьировать параметры и анализировать полученные данные. Визуализация результатов измерений в режиме реального времени облегчает понимание сложных физических и химических процессов, что особенно важно для учащихся, испытывающих трудности с абстрактным мышлением.

Во-вторых, это формирует у учащихся целостное представление о мире и взаимосвязи различных наук. Демонстрация того, что знания и навыки, полученные на уроках химии, могут быть успешно применены для решения задач на уроках физики, и наоборот, убеждает учащихся в единстве научного знания и его практической значимости.

В-третьих, это обеспечивает более глубокое усвоение понятий и способствует формированию прочных знаний. Активное участие в эксперименте позволяет учащимся лучше понять суть явлений, запомнить основные закономерности и научиться применять полученные знания на практике. Это особенно важно в контексте проблемы забывания изученного материала, с которой сталкиваются многие учащиеся.

Наконец, применение междисциплинарного подхода, когда знания и навыки, полученные на одном предмете, применяются на другом, способствует повышению успеваемости учащихся, развитию их познавательного интереса и формированию более целостного представления о мире. Исследования показывают, что подобная интеграция знаний приводит к более успешному освоению материала учащимися, а также развивает их исследовательские навыки и познавательный интерес. Таким образом, внедрение цифровых лабораторий в учебный процесс открывает новые возможности для повышения качества образования и подготовки учащихся к успешной деятельности в современном научно-техническом мире.

**Литература:**

1. Маматова Г.Д., Кучкаров Т.С. Актуальные концепции «Цифровой университет»: литературный обзор отечественных и зарубежных исследований. // Информатика. Экономика. Управление, 2024, том 3, №1, с. 0101-0158.
2. Залесова Н.В. Формирование научных понятий //Известия Уральского государственного университета. - 2009, - № 4(68). – С. 126-134.
3. Методические разработки лаборатории «Releon» [Электронный ресурс]. URL: <https://rl.ru/support> (дата обращения: 11.08.2025).
4. Методические разработки лаборатории «Releon»: Лабораторная работа №21 «Свойства бромной воды» [Электронный ресурс]. URL: <https://rl.ru/support> (дата обращения: 11.08.2025).
5. Методические разработки лаборатории «Releon»: Лабораторная работа №30 «Окисление спиртов» [Электронный ресурс]. URL: <https://rl.ru/> (дата обращения: 11.08.2025).
6. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. «Determinations of total carotenoids and chlorophylla a and b of leaf extracts in different solvent». Biochemical Society of Transactions, 1983, 11, pages 591-592.
7. Ana-Maria Hossú, Mihaela Scripcariu, Cristina Radulescu, Elena Irina Moater, Ionica Ionita «Determinations chromatographiques, spectrophotometriques et titrimetriques de vitamine C dans pharmaceutiques» // Scientific study and research, 2006, Vol. VII, №1, pp. 233-238;
8. Şükran Dere, Tohit Güneş, Ridvan Sivaci «Spectrophotometric determination of chlorophyll – a, b and total carotenoid contents of some Algae species using different solvents». // Tr. J. of Botany, 1998, Vol. 22, pp. 13-17.
9. Alan R. Wellburn «The Spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution». // J. Plant Physiol., 1994, Vol. 144, pp. 307-313.
10. Monge E., J. Val and L. Heras «Quantitative analysis of higher plant pigments by HPLC». // An Aula Dei, 1984, Vol. 17, №1-2, pp. 60-66
11. Sorby H.C. // Proc. Roy. Soc., 1873, Vol. 21, pp. 442-483.
12. Манин К.В. «Применение новых обучающих технологий на предмете химия»// Всероссийский профессиональный конкурс педагогического мастерства «Мастер-класс – традиции и инновации», в рамках федерального проекта «Современная школа», 2024.
13. Кунаш М.А., Телебина О.А. Использование цифровых лабораторий на уроках физики и химии. ГАУДПО МО «ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ ОБРАЗОВАНИЯ», 2023
14. Бабкина Наталья Владимировна. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАК СРЕДСТВА ИНТЕГРАЦИИ ХИМИИ И БИОЛОГИИ В ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ // Бюджетное общеобразовательное учреждение города Омска «Средняя общеобразовательная школа № 77», 2024

# МЕДИЦИНА

## ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ НАРУШЕНИЯ И СОСТОЯНИЕ ВЕГЕТАТИВНОГО ТОНУСА У ПАЦИЕНТОВ С ПНЕВМОНИЕЙ

*Лакотко Татьяна Георгиевна*

кандидат медицинских наук

УО «Гродненский государственный медицинский университет»

доцент

*Самаравира Умайя, Романюк Диана Дмитриевна, студенты, УО «Гродненский государственный медицинский университет»*

**Ключевые слова:** пневмония; симпатическая и парасимпатическая вегетативная нервная система; индекс Кердо; пиковая скорость выдоха

**Keywords:** pneumonia; sympathetic and parasympathetic autonomic nervous systems; Kerdo index; peak expiratory flow

**Аннотация:** Пневмония является распространенным инфекционным заболеванием, которое характеризуется нарушением адаптационных способностей организма. В статье рассматривается проблема влияния пневмонии на вегетативный тонус и легочную вентиляцию, а также установление взаимосвязи между данными показателями. Результаты исследования позволяют подробнее уточнить важность вышеописанных параметров для определения особенностей протекания заболевания.

**Abstract:** Pneumonia is a common infectious disease that is characterized by impaired adaptive abilities of the body. The article discusses the problem of the effect of pneumonia on autonomic tone and pulmonary ventilation, as well as the relationship between these indicators. The results of the study allow us to clarify in more detail the importance of the above parameters for determining the features of the course of the disease.

### УДК 615

**Актуальность.** Течение пневмонии зачастую сопровождается нарушениями вентиляционной функции легких, которые могут быть обусловлены различными изменениями. Развитие рестриктивных изменений связано с уменьшением эффективной поверхности легких, вовлеченной в газообмен. Кроме того, у пациентов с пневмонией может наблюдаться воспалительный отек слизистой бронхов, бронхоспазм и/или локальная обтурация бронхов мокротой, и как следствие, появление обструктивных изменений [1]. С целью оценки наличия и выраженности обструктивных нарушений при пневмонии возможно определение пиковой скорости выдоха (ПСВ).

Общеизвестно, что течение клиническая симптоматика пневмонии может сопровождаться астеническим и некоторыми иными синдромами, являющимися следствием дисфункции вегетативной нервной системы (ВНС). При этом, состояние

ВНС у данной категории пациентов характеризуется значительными изменениями, которые зависят от тяжести заболевания, стадии его развития и индивидуальных характеристик организма [2]. Ряд авторов отмечает, что развитие пневмонии может ассоциироваться с вегетативно-сосудистыми пароксизмами, свидетельствующими о преобладании симпато-адреналовых реакций у данной категории пациентов. По мнению других авторов особенности течения пневмонии (затянувшееся обострение бронхо-легочного процесса, раннее присоединение бронхоспазма, частая остаточная симптоматика, быстрое прогрессирование заболевания) зависели от выраженности вегетативных расстройств [3]. Однако, исследования о состоянии вегетативной нервной системы при пневмониях немногочисленны. Кроме того, актуальным представляется изучение влияний ВНС на параметры функции внешнего дыхания.

**Цель исследования** – изучить параметры вентиляционной функции легких и состояние ВНС у пациентов с пневмонией и взаимосвязь этих показателей.

**Материал и методы.** Исследование выполнялось на базе УЗ «ГКБ № 2 г. Гродно». Критерии включения: внегоспитальная пневмония средней степени тяжести при наличии одностороннего поражения без сопутствующей патологии. Всего обследовано 119 пациентов (средний возраст –  $30,8 \pm 8,8$  лет). Пациенты были разделены на группы по полу: 1 группу составили 51 пациент мужского пола, 2 группу – 68 пациентов женского пола, группы были сопоставимы по возрасту. Курящих обследованных среди мужчин было 52%, среди женщин – 20%. Все пациенты были обследованы согласно протоколам диагностики и лечения МЗ РБ. Дополнительно рассчитывали вегетативный индекс Кердо (для определения тонуса вегетативной нервной системы) [4], установленный тип саморегуляции кровообращения (ТСК) (для оценки расхода резервов сердечно-сосудистой системы на обеспечение тока крови по сосудам) [5]. Кроме того, производили оценку пиковой скорости выдоха (ПСВ) (данные представляли в процентах от нормы). Дополнительные исследования выполняли на 4-5 сутки от поступления в стационар, на фоне нормальной температуры.

Обработка полученных данных производилась при помощи непараметрических методов статистики. Данные в работе представлены в виде медианы и 25-го и 75 перцентилей (Me (25% и 75%)). За достоверный принимался уровень при  $p < 0,05$ .

### **Научная новизна**

Приведенные ниже данные способны расширить представление о вентиляционных нарушениях при пневмонии у различных групп пациентов и понять механизмы их формирования. Полученные результаты исследования могут быть использованы в реальной клинической практике при определении тактики терапии и профилактике затяжного течения пневмонии.

**Результаты.** При расчете индекса Кердо было установлено, что у 54% пациентов наблюдалось преобладание тонуса симпатической нервной системы (СНС). При этом достоверных различий по тону между группами не наблюдалось (симпатикотония была у 54% женщин и у 53 % мужчин).

У всех пациентов с пневмонией наблюдалось снижение ПСВ (% от должного) – он составил 68 (51; 77) %. При этом (как представлено в таблице 1) достоверных различий по данному показателю не было обнаружено при сравнении среди мужчин

и женщин. По сумме баллов при расчете ТСК статистически значимых различий между группами пациентов мужского и женского пола выявлено не было (98 (92; 106) и 97 (85; 113) соответственно).

**Таблица 1. Исследуемые показатели в группах сравнения**

Показатель	Группа 1 (n=51)	Группа 2 (n=68)	p уровень
Возраст	30 (23; 39)	31 (22,5; 37)	0,842355
ИМТ	25,6 (22,4; 29,2)	22 (20,4; 26,4)	0,001424
ЧСС	88 (75; 96)	80 (74; 87)	0,006478
ЧД	16 (14; 19)	16 (14; 19)	0,841641
ПД	39 (35; 45)	38 (32; 42,5)	0,173844
ПСВ %N	72 (48; 81)	67 (52; 76)	0,583877
Индекс Кердо	1,1 (-6,5; 7,9)	2,7 (-13,8; 14,4)	0,859140
ТСК	98,9 (92,1; 106,5)	97,3 (85,1; 114,1)	0,657750

Дополнительно был произведен анализ влияния сопутствующих факторов (курения, ИМТ, вегетативного тонуса) на изучаемые показатели. Среди курящих и некурящих параметр ПСВ (% от должного) достоверно не отличался ((72 (52; 82) и 67 (52; 77) соответственно). Однако, у пациентов, имеющих по данным индекса Кердо превалирование тонуса СНС, отмечались достоверно более низкие значения ПСВ (% от должного) по сравнению с парасимпатиками (67 (50; 77) и 72 (62; 84) соответственно ( $p < 0,05$ )). Кроме того, пациенты с избыточной массой тела имели более высокие значения ПСВ (% от должного) по сравнению с пациентами с нормальной массой тела (76 (56; 88) и 67 (52; 76) соответственно ( $p < 0,05$ )).

С учетом полученных данных была более детально оценена величина ПСВ (% от должного) в каждой из исследуемых групп. В результате установлено, что более высокие значения ПСВ (% от должного) были у мужчин с избыточной массой тела по сравнению с пациентами того же пола с нормальной массой тела (77 (63; 87) и 60 (47; 77) соответственно ( $p < 0,05$ )). В группе пациентов женского пола похожей тенденции не наблюдалось и значения ПСВ (% от должного) находились в следующих пределах: 63 (52; 88) – при повышенном ИМТ и 67 (52; 74) – при нормальном ИМТ (достоверных различий не было). Анализ влияния курения на параметр ПСВ (% от должного) отдельно в группе мужчин и группе женщин не позволил обнаружить достоверные различия.

Дополнительно вышеописанные группы были разделены на подгруппы в соответствии с превалирующим тонусом ВНС на основании данных индекса Кердо. Полученные данные представлены в таблицах 2 и 3.

**Таблица 2. Исследуемые показатели в группе мужчин в зависимости от тонуса ВНС**

Показатель	Подгруппа мужчины симпатиками (n=27)	Подгруппа мужчины парасимпатиками (n=24)	р уровень
ИМТ	24 (22,4; 31,6)	26,2 (24; 28,4)	0,884324
ЧСС	92 (88; 99)	75 (72; 83)	0,000033
ЧД	16 (15; 18)	16 (13; 20)	0,801543
ПД	39 (35; 46)	37 (35; 45)	0,700073
ПСВ %N	74 (48; 78)	72 (52; 86)	0,574687
Индекс Кердо	7,6 (3,1; 11,7)	-10,7 (-21,3; -5,9)	0,000000
ТСК	92,4 (88,3; 96,9)	110,7 (105,9; 121,3)	0,000000

Как видно из таблицы 2 у пациентов мужского пола, имеющих по данным индекса Кердо превалирование тонуса СНС не наблюдалось достоверных различий показателя ПСВ (% от должного) по сравнению с парасимпатиками.

**Таблица 3. Исследуемые показатели в группе женщин в зависимости от тонуса ВНС**

Показатель	Подгруппа женщины симпатиками (n=37)	Подгруппа женщины парасимпатиками (n=31)	р уровень
ИМТ	22,1 (19,7; 26)	22,1 (20,7; 25,5)	0,248593
ЧСС	85 (78; 90)	74 (66; 79)	0,000008
ЧД	16 (14; 19)	17 (14; 19)	0,708045
ПД	35 (31; 40)	40 (38; 45)	0,003752
ПСВ %N	65 (51; 73)	71 (62; 83)	0,047044
Индекс Кердо	13,7 (5,8; 18,4)	-14,5 (-22,8; -8,2)	0,000000
ТСК	86,3 (81,5; 94,2)	114,5 (108,2; 122,9)	0,000000

Таблица 3 демонстрирует, что у пациентов женского пола, имеющих по данным индекса Кердо превалирование тонуса СНС отмечались достоверно более низкие значения ПСВ (% от должного) по сравнению с парасимпатиками ( $p < 0,05$ )).

При расчете коэффициента корреляции Спирмена у всей популяции обследуемых пациентов была установлена достоверная слабая отрицательная взаимосвязь между индексом Кердо и ПСВ % ( $r=-0,23$ ).

При расчете коэффициента корреляции Спирмена среди пациентов женского пола выявлена достоверная слабая отрицательная взаимосвязь между индексом Кердо и ПСВ % ( $r=-0,25$ ), и слабая положительная взаимосвязь между ТСК и % ПСВ ( $r=0,25$ ). В группе пациентов мужского пола подобных закономерностей выявлено не было. Обнаруженные взаимосвязи состояния вегетативного тонуса и ПСВ среди пациентов женского пола возможно связаны с большей лабильностью вегетативной нервной системы, реактивностью ее симпатического отдела, что имело отражение в виде развития сопутствующего бронхобструктивного синдрома. Кроме того, согласно некоторым литературным данным при стимуляции нервов СНС увеличивается секреция слизи в дыхательных пути, вязкость и количество которой зависят от типа стимулируемого адренорецептора.

В соответствии с интерпретацией ТСК более низкое значение данного показателя ассоциируется с менее экономичным уровнем функциональности сердечно-сосудистой системы и высокой напряженностью ее функционирования. Согласно полученным нами данным у пациентов женского пола при пневмонии наблюдается более выраженное снижение адаптационных возможностей их сердечно-сосудистой системы к нагрузкам (в том числе на фоне интоксикации) и большая склонность к развитию вентиляционных нарушений по обструктивному типу.

### **Выводы.**

1. У большинства пациентов с пневмонией на фоне развития инфекционного процесса, приводящего к тахикардии и повышенному артериальному давлению, наблюдалось преобладание тонуса симпатической нервной системы.
2. Наличие симпатикотонии при пневмонии ассоциировалась с более выраженными нарушениями вентиляционной функции легких, что подтверждается наличием взаимосвязей между индексом Кердо и пиковой скоростью выдоха.
3. Более выраженные влияния вегетативной нервной системы на показатели пиковой скорости выдоха наблюдались среди женщин.

### **Литература:**

1. Нарушения функции внешнего дыхания при различных формах легочной патологии / С. Б. Шустов [и др.] // Пульмонология. – 2017. – № 27 (3). – С. 410–418.
2. Вегетативные дисфункции у детей с острой внебольничной пневмонией и пути медикаментозной коррекции / С. Л. Няньковский [и др.] // Здоровье ребенка. – 2012. – № 2 (37). – С. 55–61.
3. Мухаметжанова С. Е. О состоянии вегетативной нервной системы у больных с пылевыми поражениями легких (обзор литературы) / С. Е. Мухаметжанова // Медицина труда и промышленная экология. – 2005. – № 4. С. – 31–35.
4. Сравнительная характеристика различных методов диагностики тонуса отделов автономной (вегетативной) нервной системы / Д. Н. Букреева [и др.] // Молодой ученый. – 2022. – № 48 (443). – С. 550–552.
5. Быстрая оценка показателей сердечно-сосудистой системы с помощью

кардиореспираторных индексов / Е. Н. Мокашева [и др.] // Успехи современной биологии. – 2023. – № 2 (143). – С. 131–137.

## ФИЗИКА

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПО СЕКЦИЯМ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧЕ В ТРУБАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ПОТОКОВ С ЗАВИСИМОСТЬЮ ОТ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Лобанов Игорь Евгеньевич*

доктор технических наук  
Московский авиационный институт  
ведущий научный сотрудник

**Ключевые слова:** теплообмен; конвективный; турбулизатор; труба; модель; Менгер; Рейнольдс; секция; тепловая нагрузка; режим течения

**Keywords:** heat transfer; convective; turbulator; pipe; model; Mentor; Reynolds; section; thermal load; flow mode

**Аннотация:** Расчётными вычислительными методами исследуются зависимости распределений локальных тепловых нагрузок, осреднённых по секциям, при конвективной теплоотдаче в каналах с последовательностями периодических турбулизаторов полукруглых геометрических профилей на основах численных решений систем рейнольдсовых уравнений, с замыканием при помощи моделей переносов сдвиговых ментеровских напряжений, уравнений энергий на разномасштабной пересекающейся структурированной сетке.

**Abstract:** Computational methods are used to study the dependences of the distributions of local thermal loads averaged over sections during convective heat transfer in channels with sequences of periodic turbulators of semicircular geometric profiles based on numerical solutions of systems of Reynolds equations, with closure using models of shear stress transfer, and energy equations on a multiscale intersecting structured grid.

**УДК 532.517.4: 536.24**

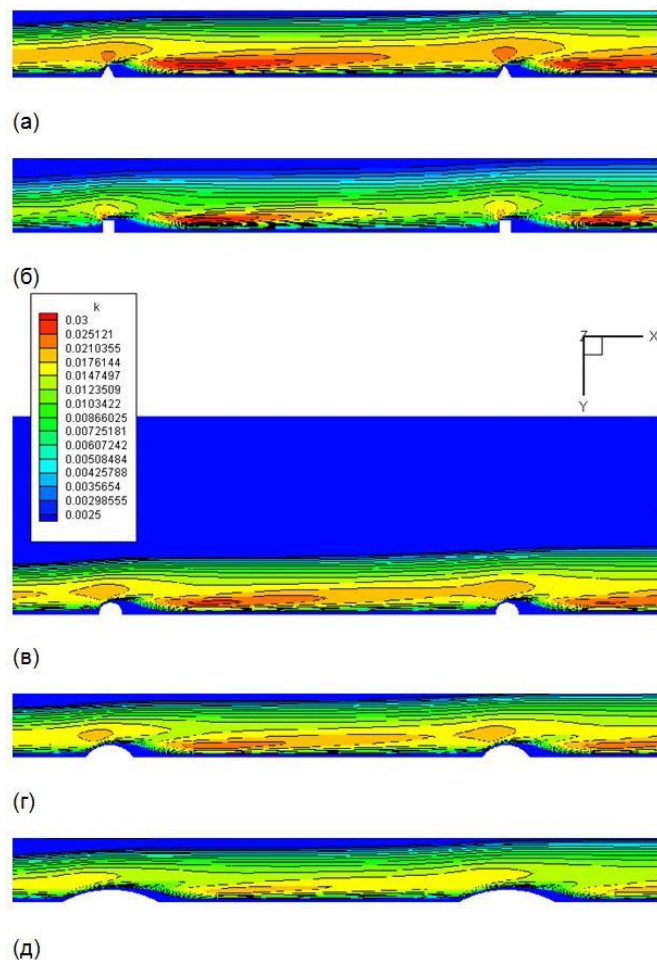
#### **Вводная часть**

Известный и хорошо апробированных на практике способ вихревой интенсификации теплообмена состоит с нанесении циклических выступов на поверхность омывания [23]. Исследование поведения теплообмена и сопротивления для этого случая в основном проводится экспериментальными методами, в то время как современные расчетные работы по данной теме крайне немногочисленны и, в основном,

опираются на интегральные подходы [1, 10, 12, 17]. На современном этапе годы для решения задач вихревой аэродинамики и теплофизики интенсивно развиваются многоблочные вычислительные технологии, базирующиеся на пересекающейся структурированной сетке [19—22, 25]. Данная работа является продолжением использования данных методов [2—5, 7, 9—11, 13—15] при анализе турбулентных потоков и теплоотдачи в каналах с циклическими турбулизаторами с различными геометрическими характеристиками и режимами течений теплоносителей, кроме всего прочего, при анализировании максимизирования тепловых нагрузок по турбулизаторным секциям.

### Влияние геометрических и режимных параметров на структурные особенности течения и локальную теплоотдачу на базе анализирования результата численного вычисления

Чтобы выявить механизм воздействия форм выступов на  $Nu/Nu_{пл}$ , приведём распределение кинетических турбулентных пульсационных энергий  $k$  для различных форм выступов при других одинаковых значениях (рис. 1).

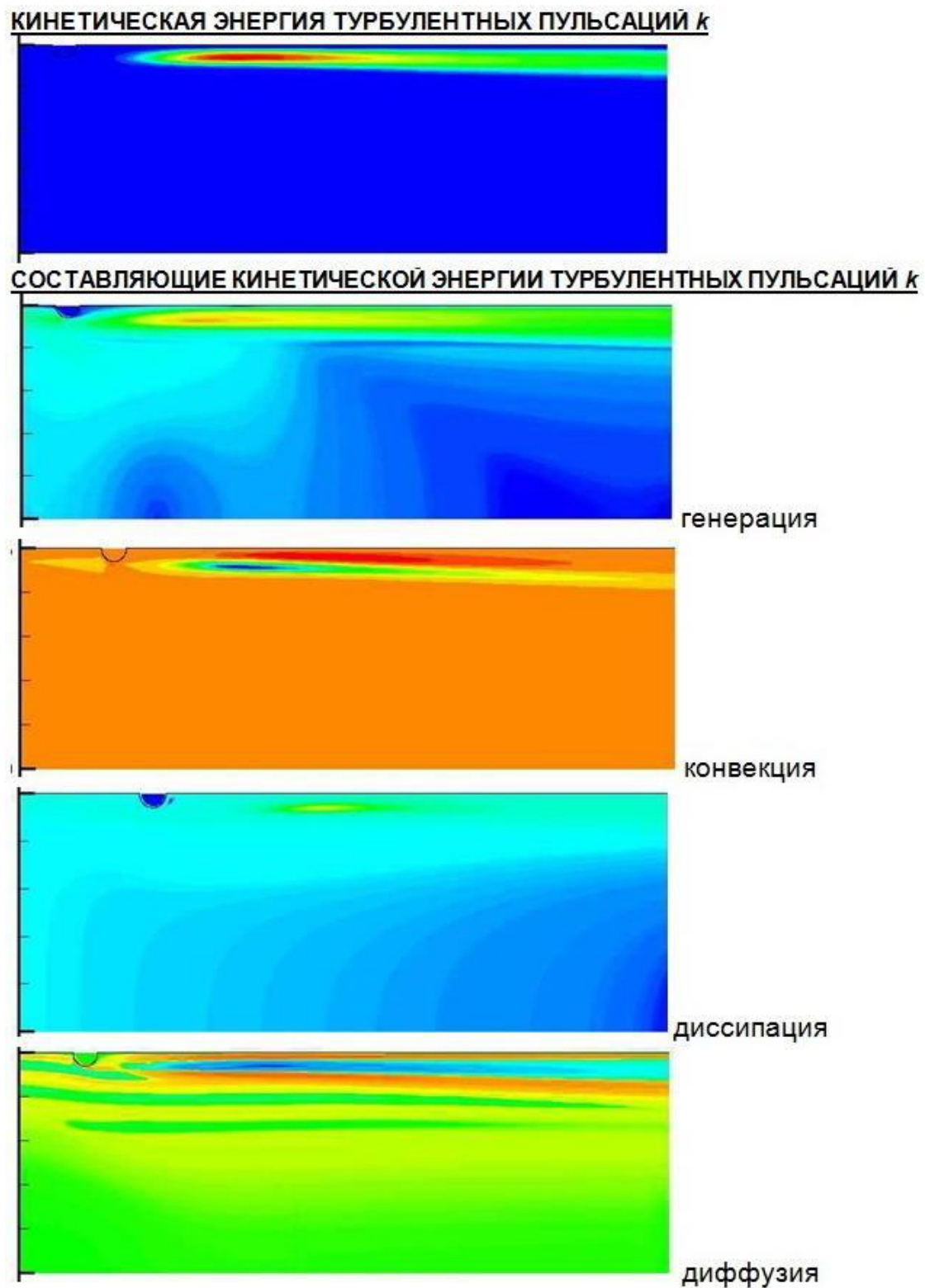


**Рис. 1. Изолинии кинетических энергий турбулентной пульсации  $k$  для кольцевой диафрагмы с треугольными формами профильных сечений (а), с квадратными формами (б), с формами поперечных профилей в форме полуокружностей (в), в форме сегмента окружностей с длинами оснований 4 — (г) и 8 — (д) при  $N = 5$ ;  $Re = 10^4$ ;  $d/D = 0,94$ ,  $t/D = 1$ .**

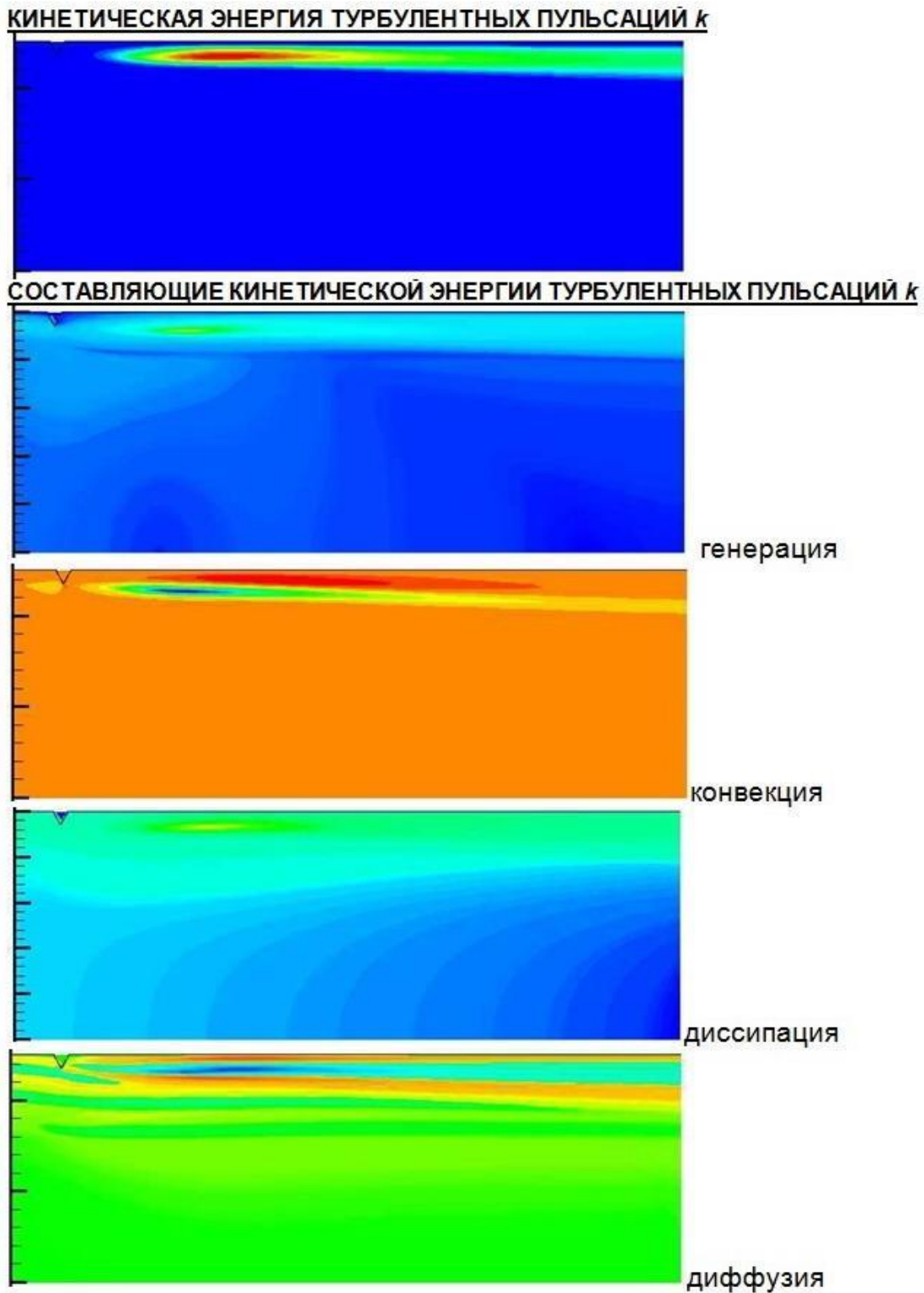
Из приведённых на рис. 1 изолиний  $k$  видно, что самые большие значения  $k$  наблюдаются вблизи треугольных выступов, имеющих наиболее острые кромки. Вблизи квадратных выступов, энергии турбулентной пульсации меньше, чем вблизи треугольных. Вблизи полукруглых выступов  $k$  имеет еще меньшие значения, чем у треугольных или квадратных.

На рис. 1 также показаны изолинии кинетических пульсационных турбулентных энергий  $k$  для выступов полукруглых трансверсальных профилей и выступов в виде двух сегментов окружности с длиной основания 4 и 8, на которых следует, что по мере увеличения радиуса скругления кинетические энергии турбулентной пульсации существенно снижаются.

В дальнейшем были получены расчётные значения компонентов кинетических энергий турбулентной пульсации — конвекции, диффузии, генерации, диссипации — для круглых труб с турбулизаторами различных поперечных сечений, частично приведённых в дифференцированном масштабе на рис. 2 и 3 при  $Re=10^4$ ,  $Pr=0,72$  и  $d/D=0,94$ . Вышеприведённые данные по стратификации кинетических энергий турбулентной пульсации позволяет выбрать наиболее оптимальные размеры и формы турбулизаторов на основе более полного их исследования, чем при использовании существующих методов расчёта.



**Рис. 2. Изолинии кинетической энергии турбулентных пульсаций  $k$  и её составляющих для труб с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения при  $Re=104$ ,  $Pr=0,72$  и  $d/D=0,94$ .**



**Рис. 3. Изолинии кинетической энергии турбулентных пульсаций  $k$  и её составляющих для труб с турбулизаторами треугольного поперечного сечения при  $Re=104$ ,  $Pr=0,72$  и  $d/D=0,94$ .**

Приведённые расчетные результаты свидетельствуют о том, что использование выступов со сглаженной формой более эффективны с точки зрения интенсификации теплообмена, так как позволяет получить бóльшие значения отношений

относительного числа Нуссельта к относительному коэффициенту гидравлического сопротивления  $(Nu/Nu_{гр})/(\xi/\xi_{гр})$  при постоянстве других определяющих параметров.

### **Влияние геометрических и режимных параметров на распределения секционных турбулизаторных тепловых нагрузок на базе анализирования результата численного вычисления**

Адекватности имеющимся опытным результатом предлагаемой вычислительной модели для местных и интегральных параметров потоков и теплоосъёма в каналах с выступами обосновывает её использования для цели выявления закономерностей распределений локальных тепловых нагрузок в каналах с выступами для секций как зависимость от геометрий выступов и режимов течений теплоносителей. В данной статье рассмотрены выступы полукруглых трансверсальных профилей, поскольку они чаще всего встречаются, что характерно трубам с диафрагмами.

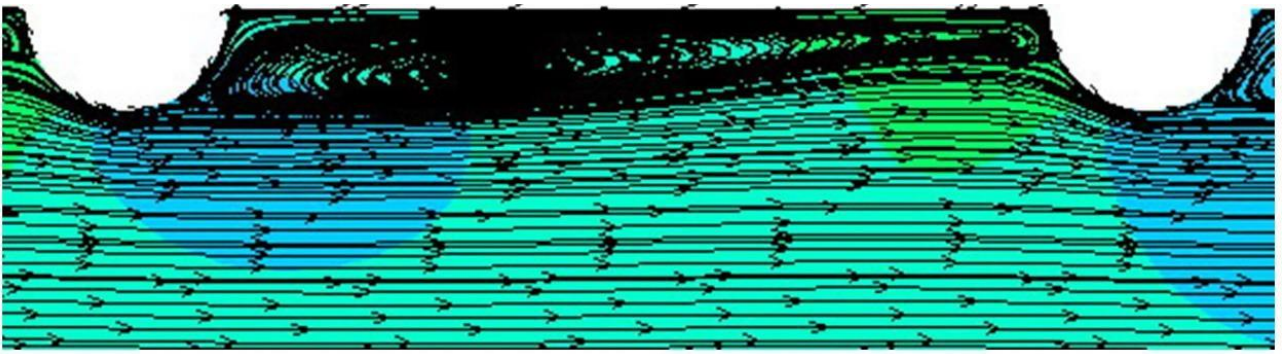
Этот аспект может представляться важным, так как есть необходимость знания, какие сечения в каналах с выступами являются в наибольшей степени нагруженными в тепловых отношениях как зависимость от определяющем симплексе характеристик.

Ранее подобные задачи рассматривались для поперечно обтекаемых коридорных пучков труб [1, 6], где постулировались т.н. первые и глубинные ряды труб в пучке [1, 6]. При относительно высоких числах Рейнольдса в межтрубном пространстве увеличивается, повышается интенсивность теплоотдачи трубы в глубинном ряду по сравнению с теплоотдачей в первом ряду, т.к. ряды в пучке являются своего рода турбулизаторами потока. В большинстве случаев теплоотдача по глубине пучков стабилизируется, начиная с 3,4 ряда; сравнение теплоотдачи труб первых и глубинных рядов позволяет судить о влиянии турбулентности потока в пучке на интенсивность теплоотдачи. Как зависимость от продольных шагов в силу турбулентностей течений теплоотдача труб глубинного ряда может увеличиваться на (30, 100)% по сравнению с теплоотдачей труб первого ряда; в большинстве случаев теплоотдача труб во втором ряду ниже, чем в глубинном на (10, 30)% [1, 6].

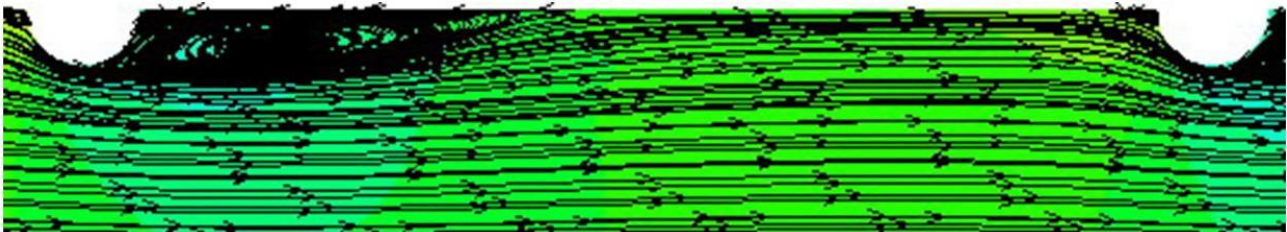
Естественно, закономерность распределений тепловых нагрузок в рядах в поперечном образе обтекаемого коридорном пучке с трубами с выступами важен учёт при относительном небольшом количестве рядов [1, 6], следовательно, вполне обоснованным выглядит предположение о важности распределений тепловых нагрузок в секциях для довольно небольших числах секций, то есть при относительно коротком канале с выступами.

Далее в настоящей статье приводится, что характеры распределений тепловых нагрузок на секциях в каналах с турбулизаторами заметно отличается от распределений тепловых нагрузок в рядах для поперечного обтекаемого коридорного трубного пучка.

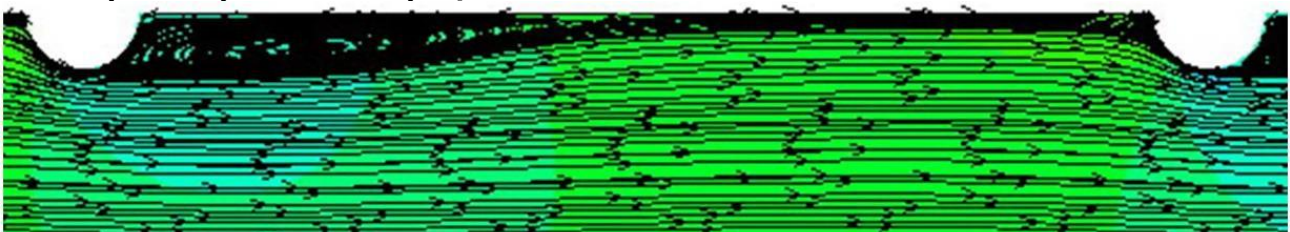
Для данного случая был использован двумерный (осесимметричный) подход к задаче. Для характерных случаев для рассматриваемого диапазона геометрических и режимных параметров ( $d/D=0,93, 0,95$ ;  $t/D=0,25, 1,00$ ;  $Re=5 \cdot 10^3, 10^5$ ;  $Pr=0,72, 10$ ) характерные линии тока для труб с турбулизаторами приведены на рис. 4—7.



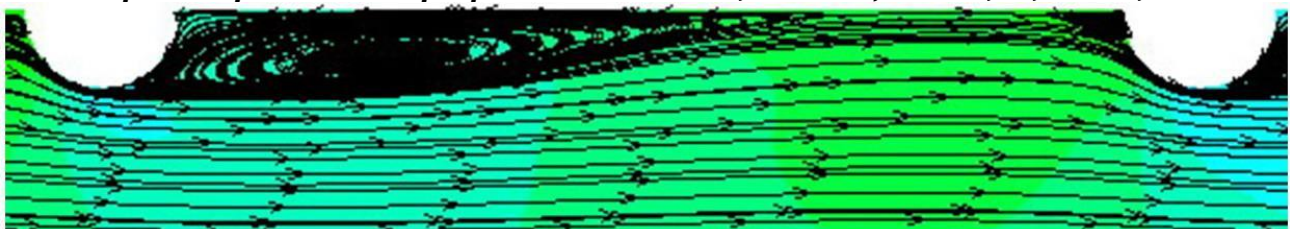
**Рис. 4. Расчётные линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей для  $Pr=0,72$ ;  $Re=10^4$ ;  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,25$ .**



**Рис. 5. Расчётные линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей для  $Pr=0,72$ ;  $Re=10^5$ ;  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ .**



**Рис. 6. Расчётные линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей для  $Pr=10$ ;  $Re=10^4$ ;  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ .**



**Рис. 7. Расчётные линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей для  $Pr=0,72$ ;  $Re=10^4$ ;  $d/D=0,93$ ;  $t/D=0,50$ .**

Подробное анализирование линий тока в трубах с выступами приводилось в [11, 13—15], по этой причине в данной статье этим аспектам не уделено достаточно интереса, так как это неспецифично. Заметим только, что аналогичное исследованиям [11, 13—15] анализирование выясняет характеры изменений местных и интегральных характеристик течений и теплоотдачи как зависимость от геометрии и режима характеристик в трубах с турбулизаторами.

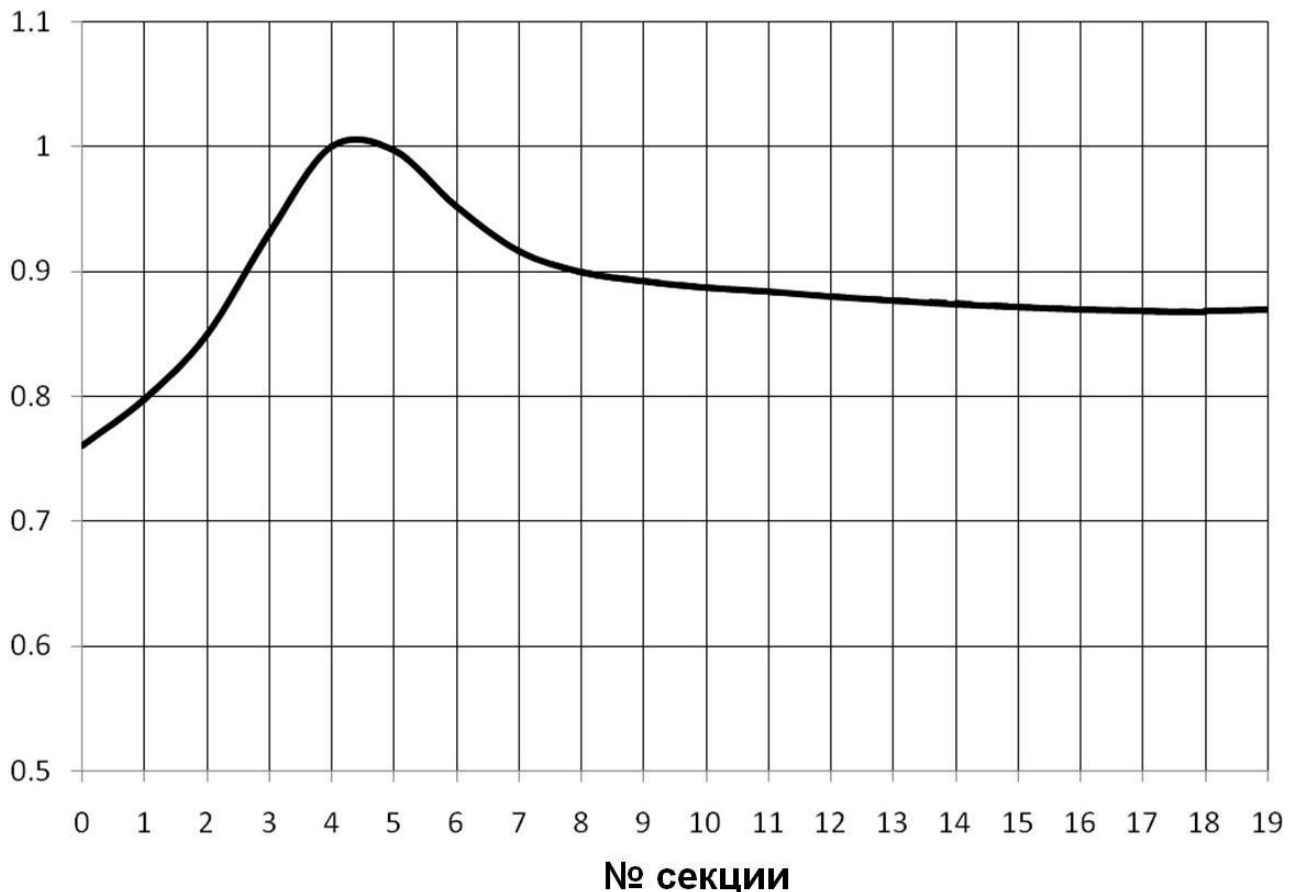
Реализация вышеизложенного метода обуславливает получение распределений тепловых нагрузок в зависимости от секций для каналов с турбулизаторами

полукруглых поперечных профилей как зависимость от геометрии турбулизаторов и режимов течения теплоносителей.

Разберём поподробнее вышеуказанные закономерности.

Характерные распределения безразмерных тепловых нагрузок  $q/q_{max}$  ( $Nu/Nu_{max}$ ) по секциям в каналах с выступами полукруглых трансверсальных профилей показано на рис. 8 для нижеследующего геометрического размера трубы и режима течения теплоносителя:  $d/D=0,97$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=8 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ .

### $Nu/Nu_{max}$

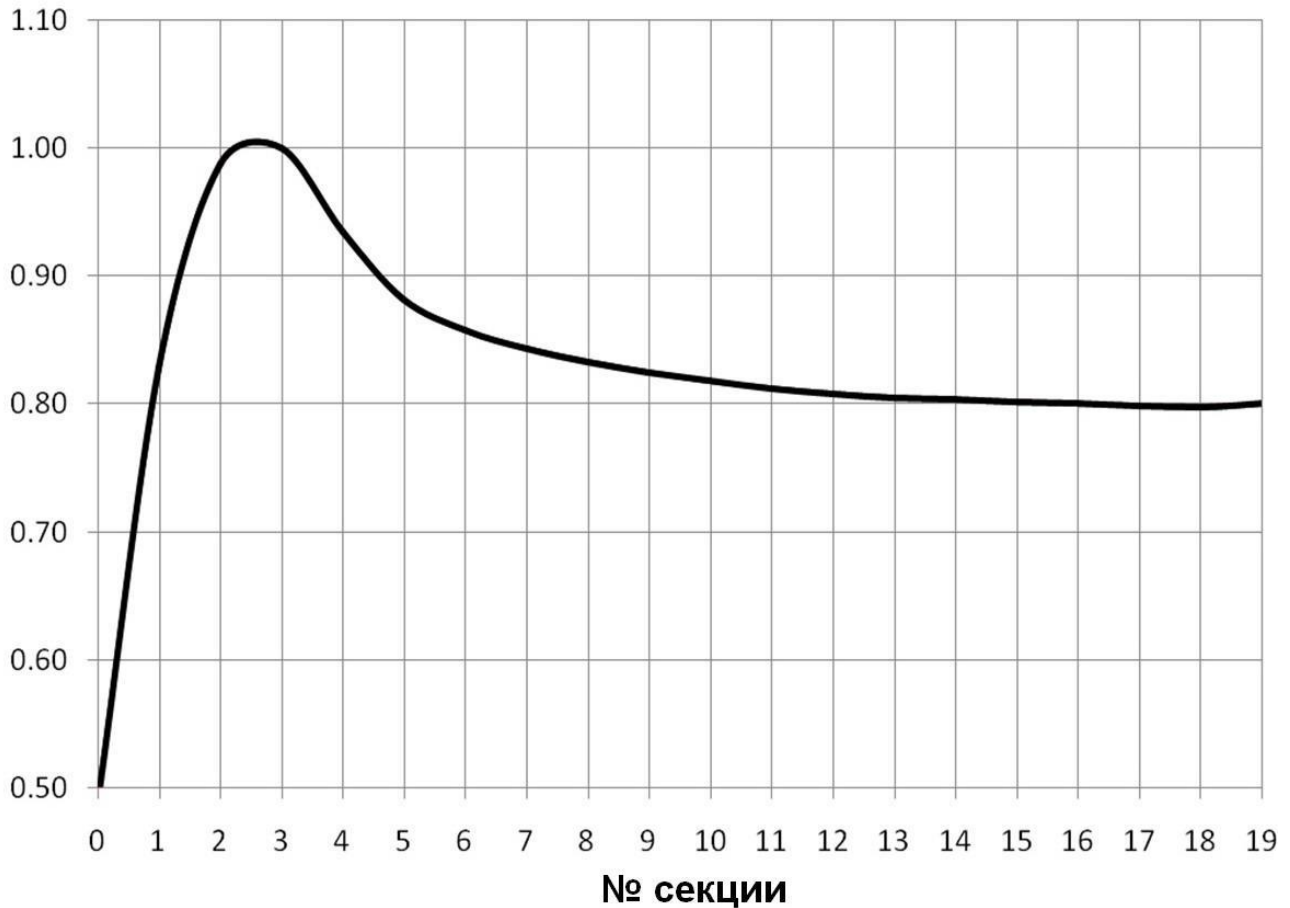


**Рис. 8. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,97$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=8 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ .**

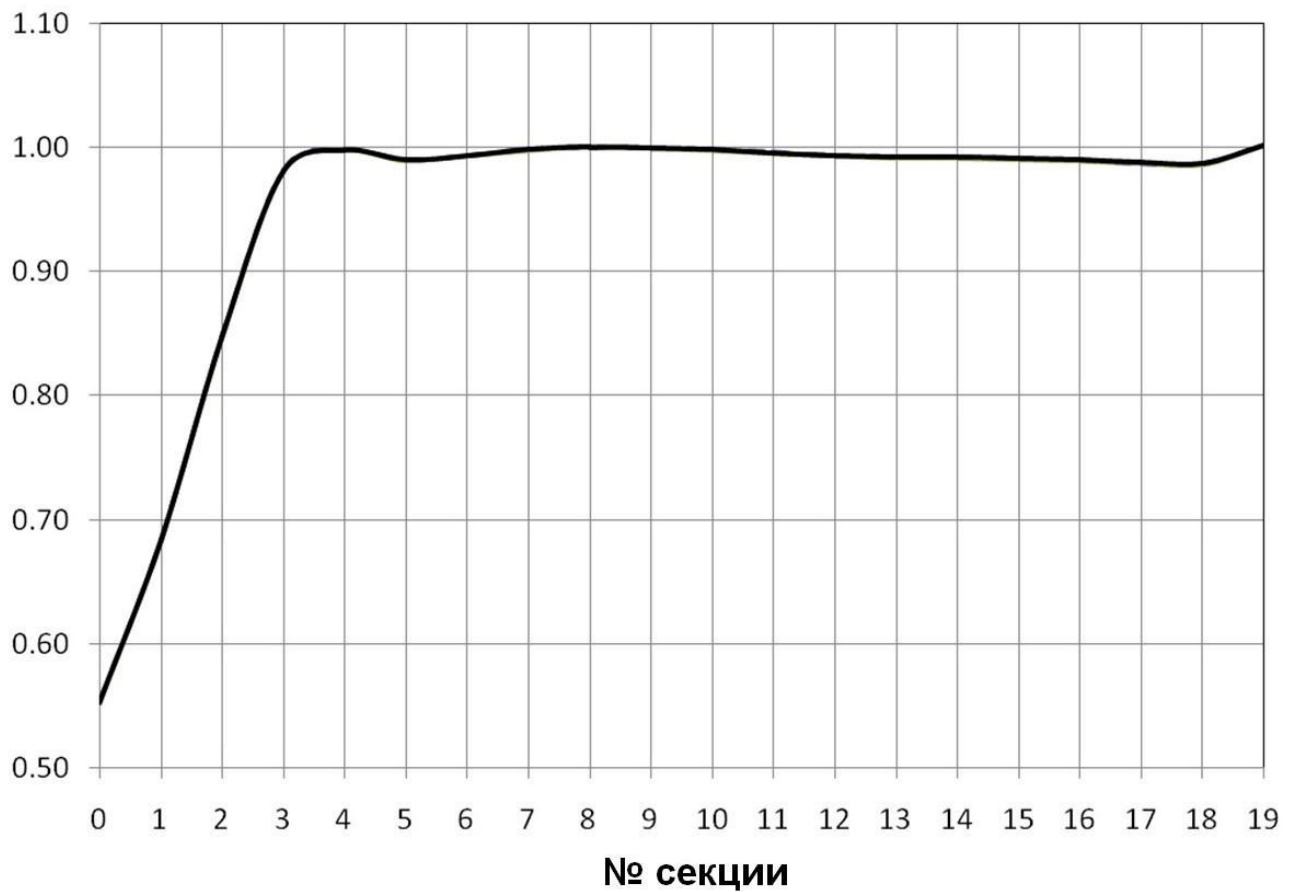
Как видно из рис. 8, присутствует максимальная безразмерная тепловая нагрузка, расположенная в точке, соответствующей 4,50 секции (здесь количественно секции являются абстрактными значениями, принятыми при сравнении, так как аутентичные числа секций должны быть натуральными числами). Характеры распределений тепловых нагрузок в секциях в трубе с выступами (рис. 8) указывают также на то, что они существенным образом отличаются от соответствующих распределений для пучков с трубами при поперечном обтекании [1, 6], а точнее: максимумы тепловых нагрузок могут располагаться на довольно дальних секционных участках, считая от от начальных.

Впоследствии были осуществлены надлежащие вычисления с целью выявления закономерностей изменений максимумов тепловых нагрузок в зависимости от геометрических характеристик турбулизаторов и режимов течения теплоносителей для других одинаковых условий. На рис. 8—20 приводятся расположения максимальных тепловых нагрузок в сечениях, позволяющих вскрыть вышеуказанные законы для характерных для каналов с турбулизаторами диапазонов определяющих характеристик:  $d/D=0,93, 0,95$ ;  $t/D=0,25, 1,00$ ;  $Re=5 \cdot 10^3, 10^5$ ;  $Pr=0,72, 10$ .

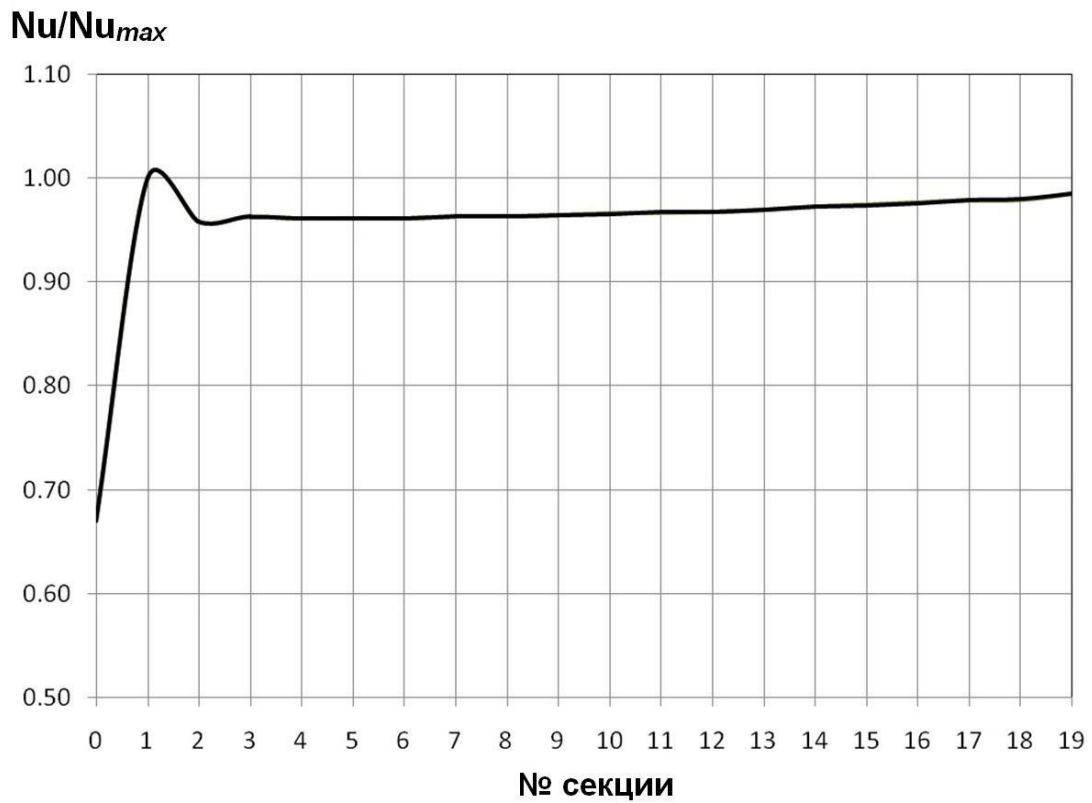
$Nu/Nu_{max}$



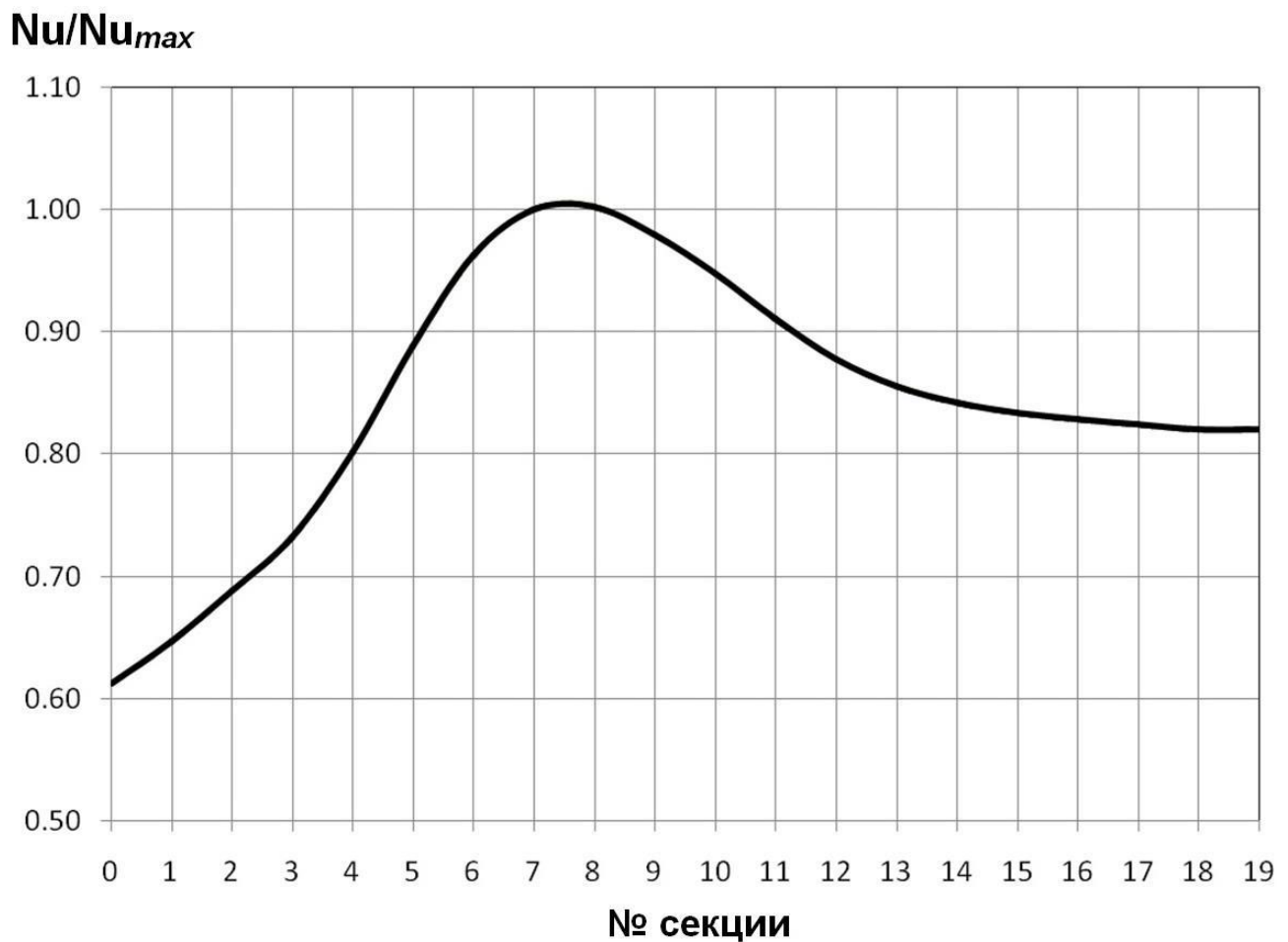
**Рис. 9. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по сечениям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

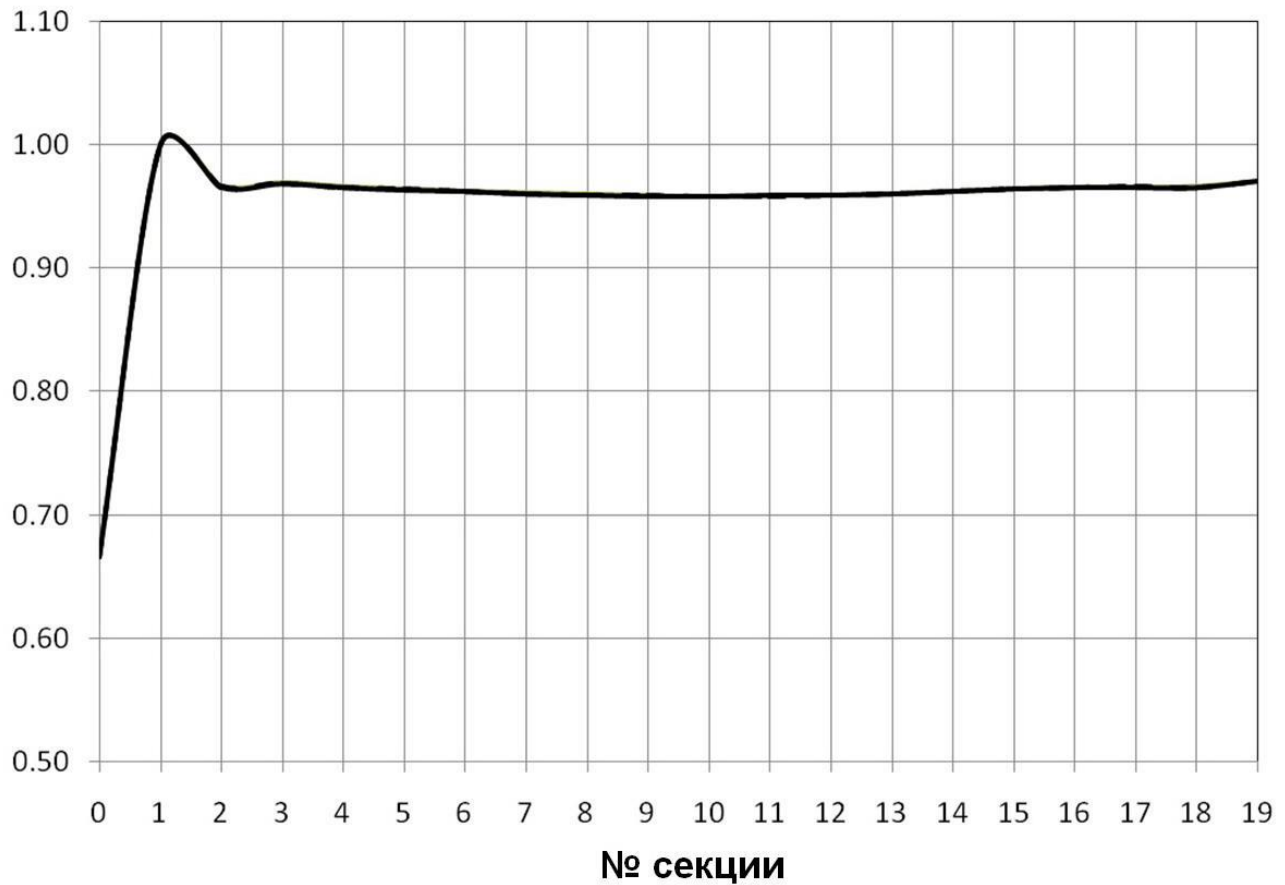
**Рис. 10. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,25$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**



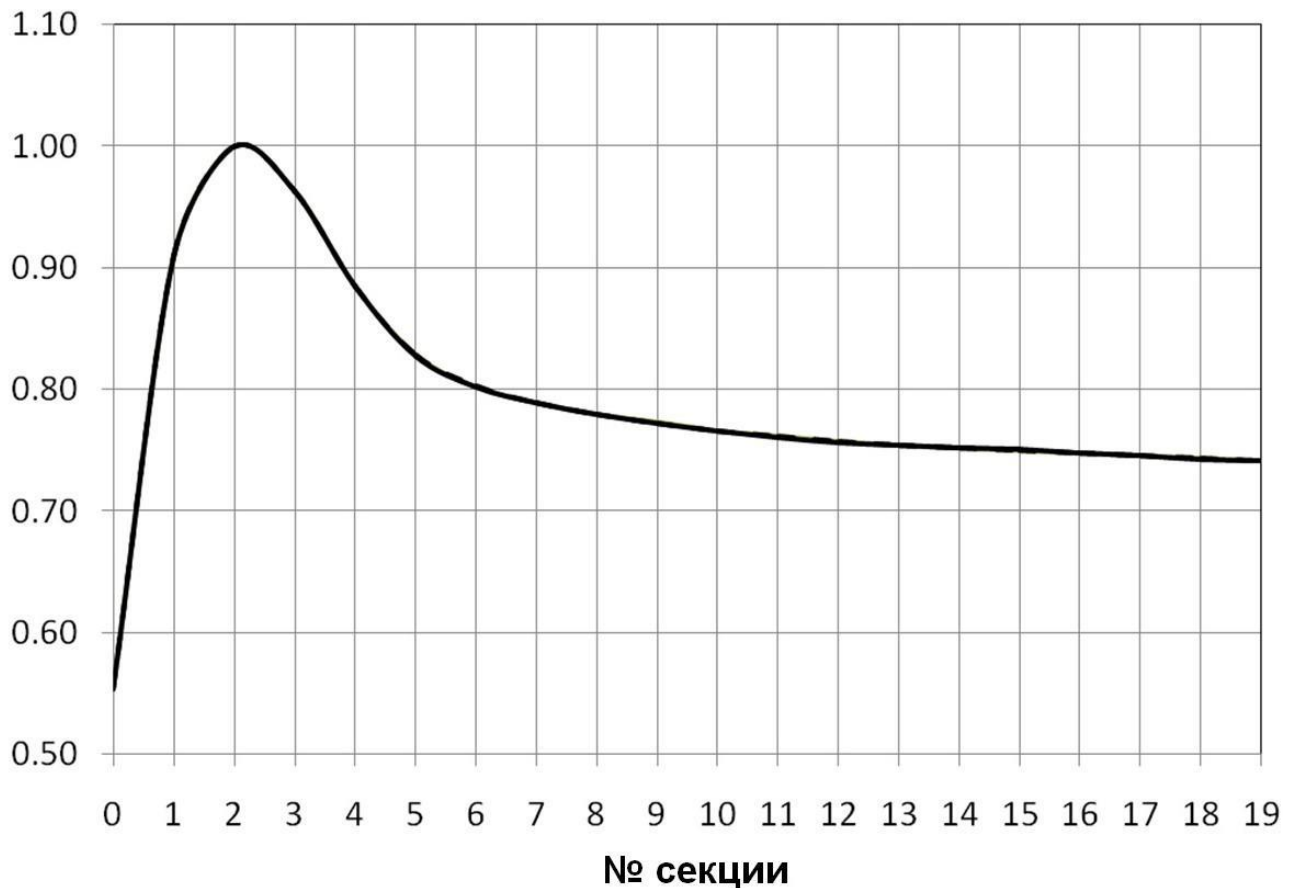
**Рис. 11. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^5$ ;  $Pr=0,72$ .**



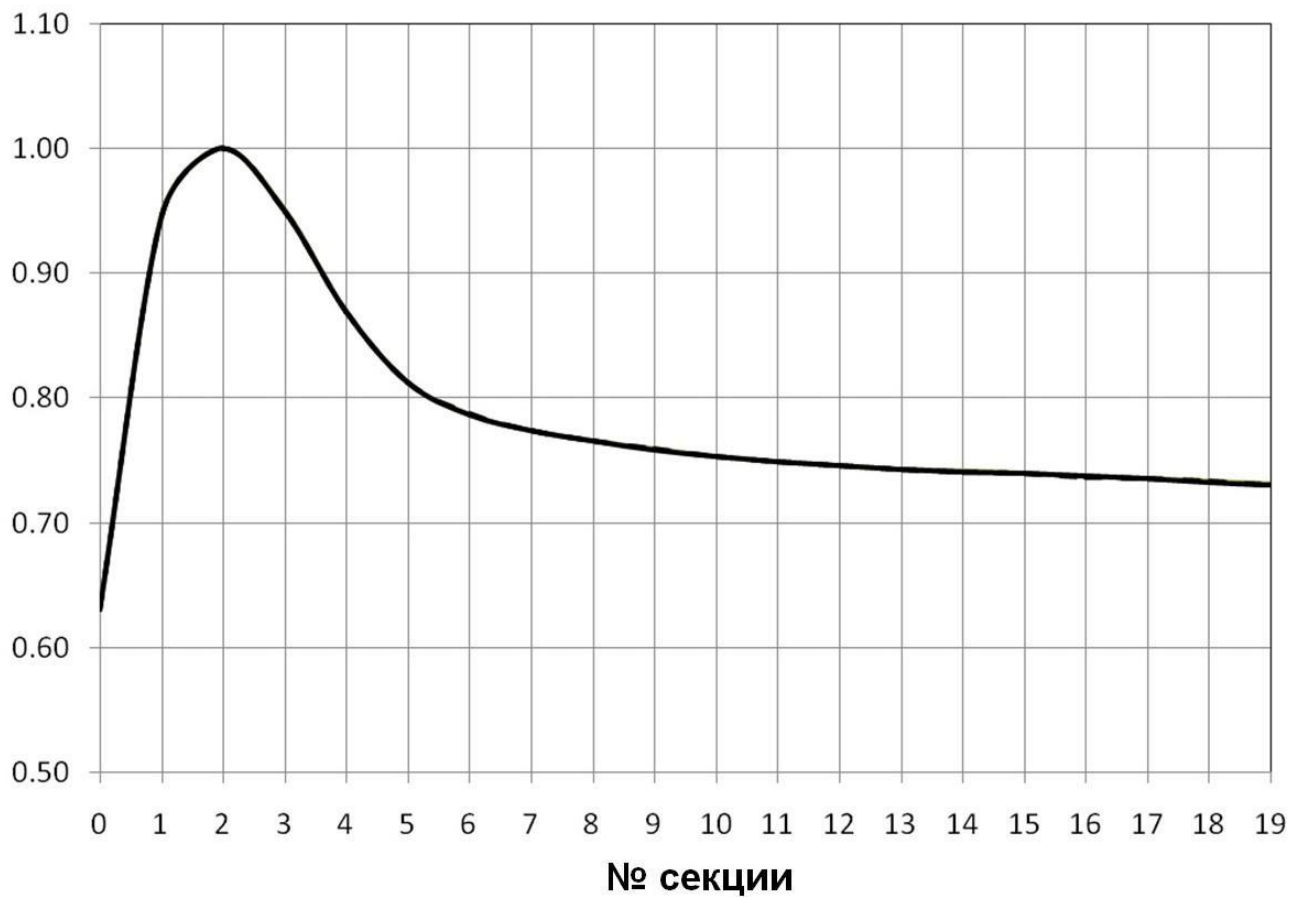
**Рис. 12. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по сечениям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=5 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

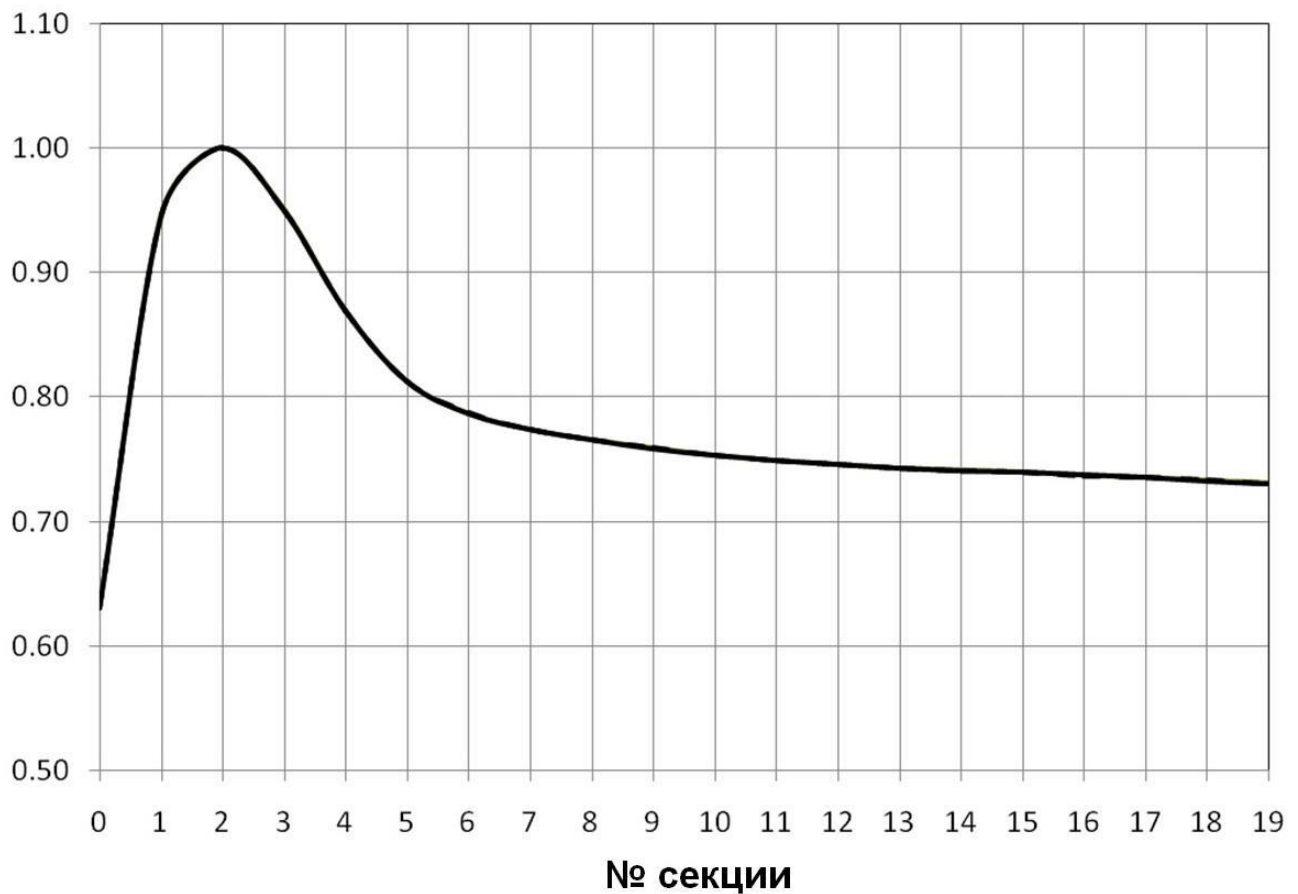
**Рис. 13. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=5 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

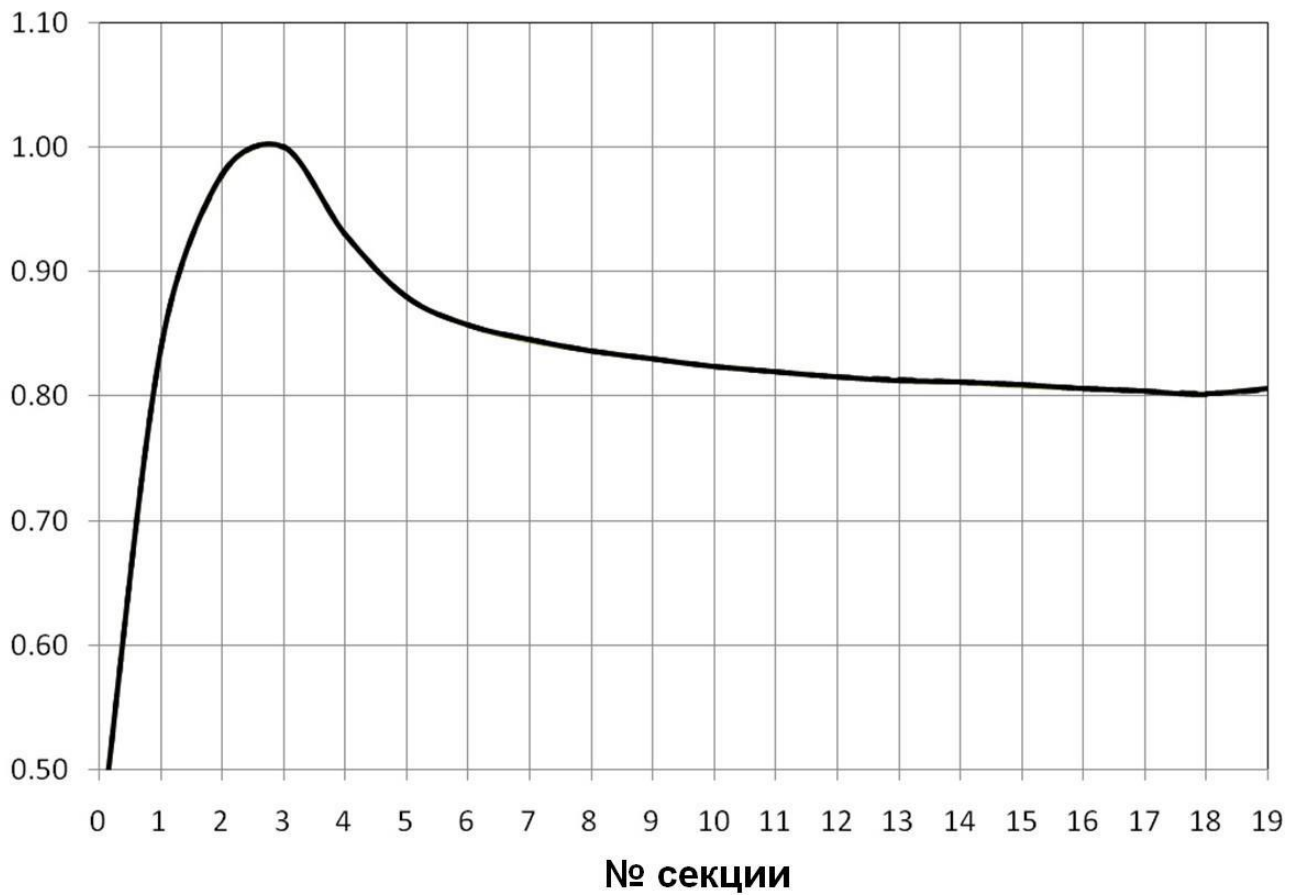
**Рис. 14. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей при  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,75$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**

**$Nu/Nu_{max}$** 

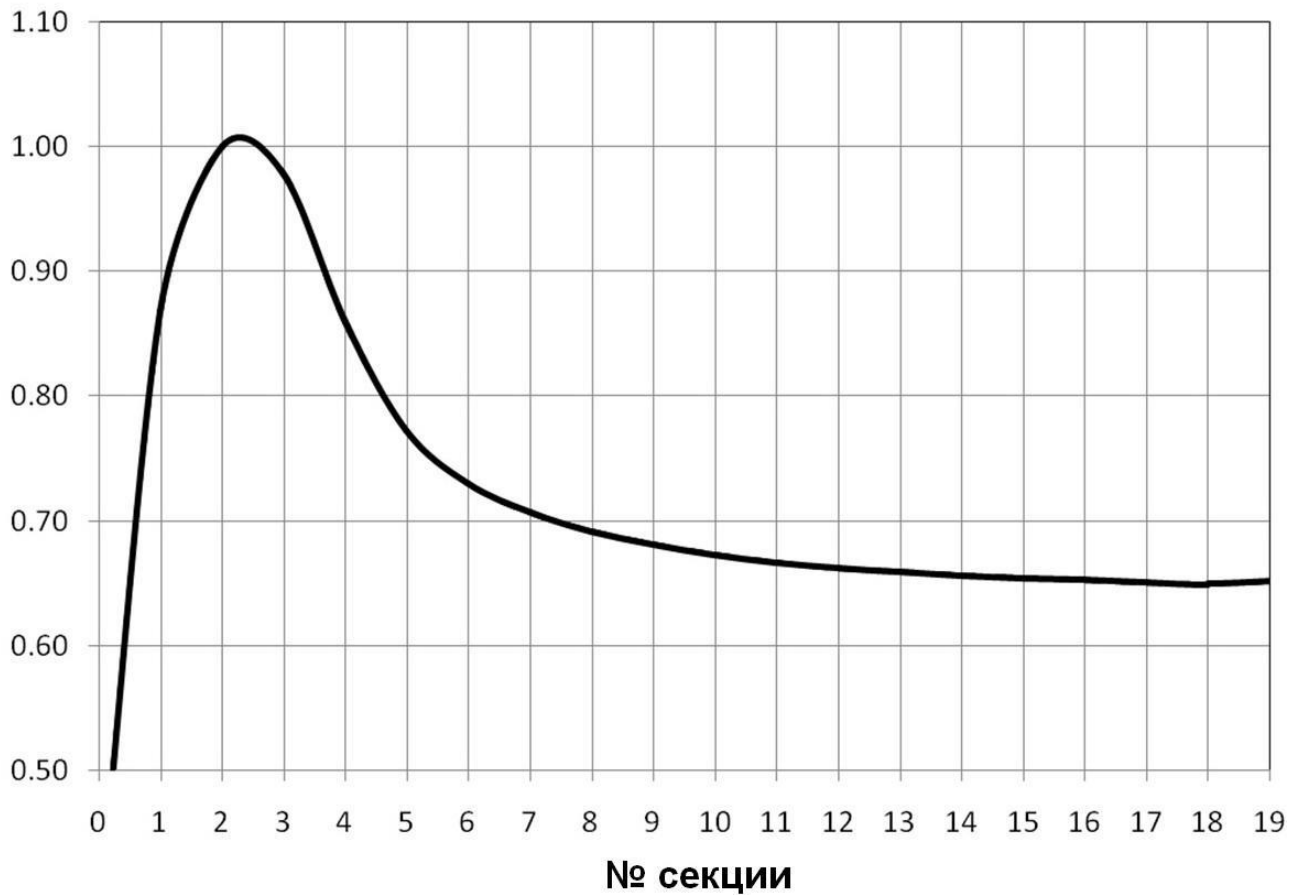
**Рис. 15. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей  $pr_{in}/D=0,95$ ;  $t/D=1,00$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**

**$Nu/Nu_{max}$** 

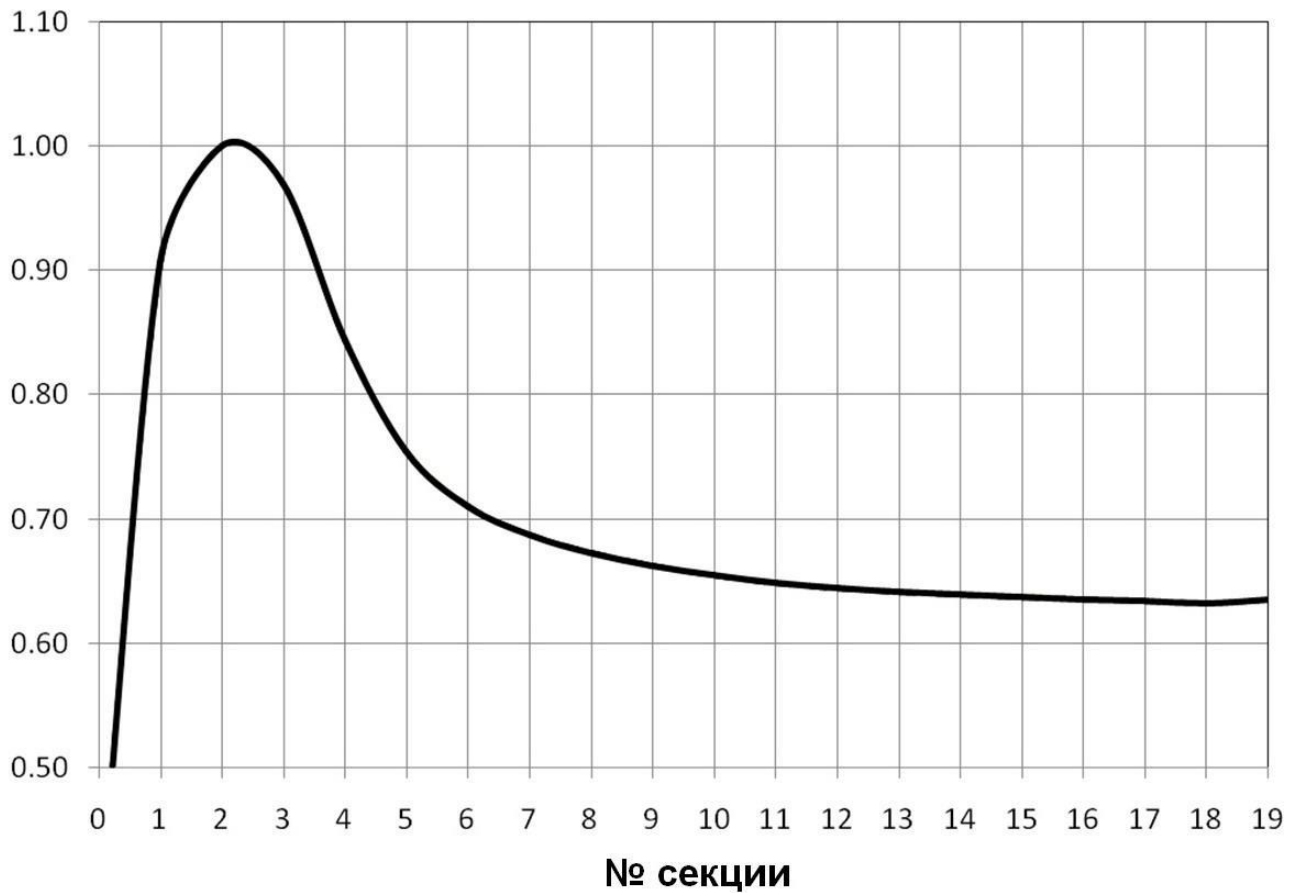
**Рис. 16. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей  $pr_{id}/D=0,94$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

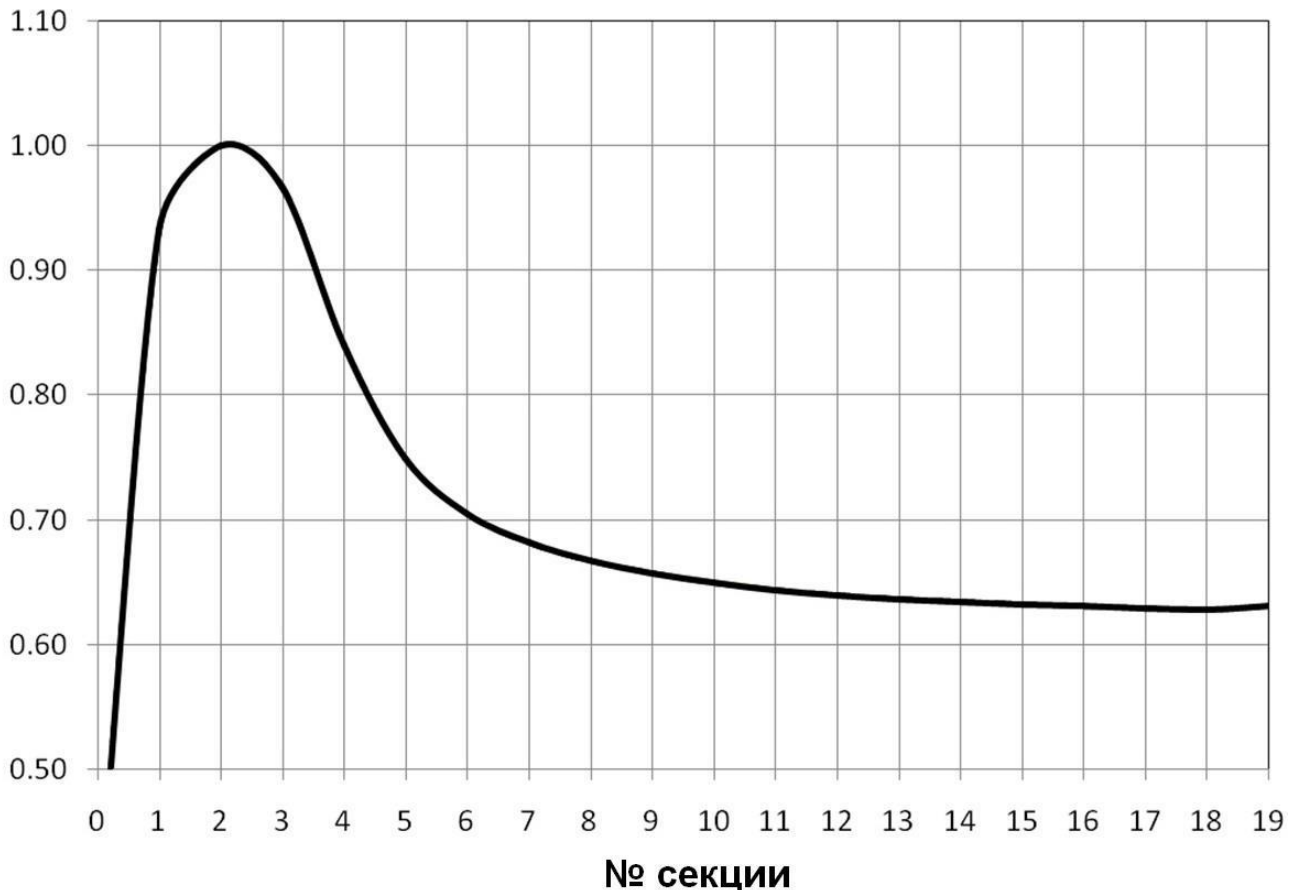
**Рис. 17. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей  $pr_{in}/D=0,93$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

**Рис. 18. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по секциям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей  $pr/d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=4$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

**Рис. 19. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по сечениям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей  $pr/d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=7$ .**

$Nu/Nu_{max}$ 

**Рис. 20. Распределения безразмерных тепловых нагрузок  $Nu/Nu_{max}$  по сечениям в каналах с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=10$ .**

В дальнейшем необходимо перейти к анализируванию полученных данных расчётного вычисления.

Анализируванию подвергаются закономерности максимумов тепловых нагрузок как от геометрии каналов с турбулизаторами, так и от режимов потоков теплоносителей. За реперные точки были приняты нижеследующие значения:  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ , как в наибольшей степени характерные.

Вначале следует обратиться к анализируванию зависимостей положения максимумов тепловых нагрузок от геометрических характеристик каналов с выступами.

В первую очередь были рассмотрены расчётные зависимости распределений тепловых нагрузок в сечениях от относительных шагов между турбулизаторами  $t/D$ . Анализирование соответствующего расчётного вычислительного материала, приведённого на рис. 9, 10, 15, указывает на то, что, при других одинаковых параметрах ( $d/D=0,95$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ), максимумы относительных тепловых потоков расположены на 4,00 сечения для  $t/D=0,25$ ; на 2,75 сечения — для  $t/D=0,50$ ; на 2,25 сечения — для  $t/D=0,75$ ; на 2,00 сечения — для  $t/D=1,00$ . Вышеприведённая информация детерминирует, что максимумы тепловых нагрузок реализуются при

более данных секциях с уменьшением относительных шагов между выступами  $t/D$ . Данные зависимости носят параболический характер; при большем увеличении относительного шага между турбулизаторами имеет место меньшее уменьшение количества секций для максимумов тепловых нагрузок. Следовательно, зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от относительных шагов между турбулизаторами являются довольно существенными.

В последующем были рассмотрены расчётные зависимости распределений тепловых нагрузок по секциям от относительных диаметров каналов с турбулизаторами  $d/D$ . Анализированные сходственных расчётов вычислений, приводящихся на рис. 9, 16, 17, показывают, что, при других одинаковых параметрах ( $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ), максимумы относительных тепловых потоков расположены на 3,00 секции для  $d/D=0,93$ ; на 2,875 секции — для  $d/D=0,94$ ; на 2,75 секции — для  $d/D=0,95$ . Вышепредставленные результаты показывают, что максимумы тепловых нагрузок реализуются при более далёких секциях для турбулизаторах больших высот. Данные зависимости носят однолинейный характер. Зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от относительных диаметров каналов с турбулизаторами являются в достаточной мере незначительными.

В дальнейшем следует обратиться к анализируемому зависимости положения максимумом тепловых нагрузок от режимных характеристик течений теплоносителей.

Вначале были рассмотрены расчётные зависимости распределений тепловых нагрузок на секциях от критерия О.Рейнольдса  $Re$ . Анализирование соответствующего расчётного материала, приведённого на рис. 9, 11, 12, 13, показало, что, при остальных одинаковых параметрах ( $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Pr=0,72$ ), максимумы относительных тепловых потоков расположены на 7,50 секции для  $Re=5 \cdot 10^3$ ; на 2,75 секции — для  $Re=10^4$ ; на 1,375 секции — для  $Re=5 \cdot 10^4$ ; на 1,25 секции — для  $Re=10^5$ .

Вышепредставленная расчётная информация указывает, что максимумы тепловых нагрузок реализуются при наиболее дальних секциях для меньших критериях О.Рейнольдса. Данные зависимости обладает свойствами кубических парабол. При больших уменьшениях критериев О.Рейнольдса имеют место большие увеличения чисел секций для максимумов тепловых нагрузок. В данные зависимости очень хорошо "ложатся" отдельные расчётные значения, показанные на рис. 8 ( $d/D=0,97$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=8 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ ). Таким образом, зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от критерия О.Рейнольдса являются очень значительными.

Далее были рассмотрены расчётные зависимости распределений тепловых нагрузок по секциям от критерия Л.Прандтля. Анализированные соответствующих результатов вычислений, которые приводятся на рис. 9, 18—20, показывают, что, при других одинаковых параметрах ( $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ), максимумы относительных тепловых потоков расположены на 2,75 секции для  $Pr=0,72$ ; на 2,625 секции — для  $Pr=4$ ; на 2,375 секции — для  $Pr=10$ . Вышепредставленные результаты акцентируют внимание на том, что максимумы тепловых нагрузок реализуются на наиболее дальних секциях для меньших критериях Л.Прандтля при других одинаковых параметрах. Приведённые закономерности являются закономерностями линейного

характера. Зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от критерия Л.Прандтля в каналах с турбулизаторами являются довольно незначительными.

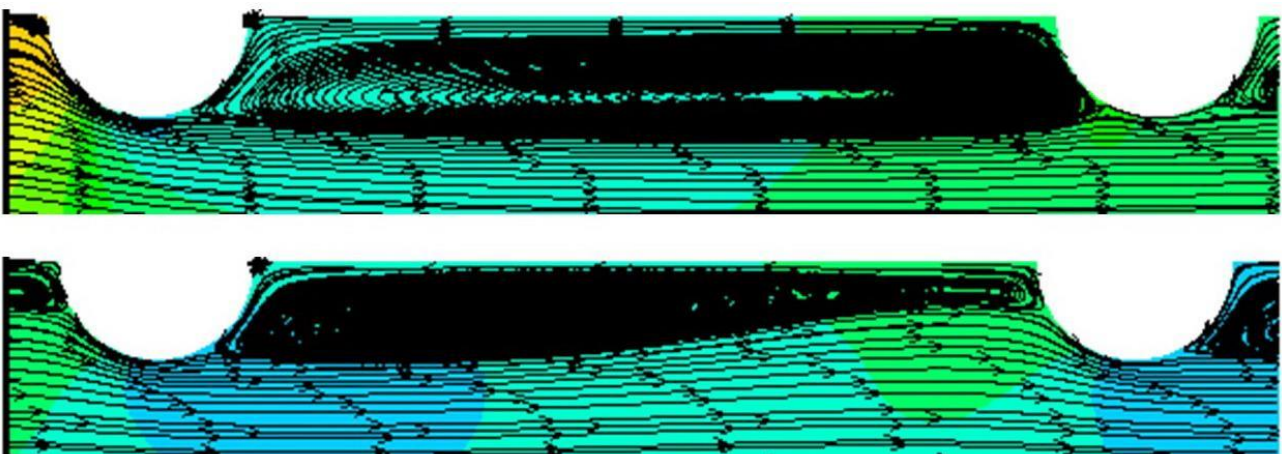
Вышепредставленное анализирование выявляет, что на расположения максимумов относительных тепловых потоков  $q/q_{max}$  ( $Nu/Nu_{max}$ ) наибольшие влияния оказывают относительные шаги между выступами  $t/D$  и критерий О.Рейнольдса  $Re$ .

Дополнительным образом можно отметить, что полученные в статье распределения тепловых потоков в трубе с турбулизаторами качественным образом различаются от аналогичных распределений в гладких круглых трубах при неизменных режимах течений, которые приводятся, напр., в [8, 18, 24], где имеют место монотонные убывания коэффициентов теплоотдачи по длинам труб.

### **Структуры смерчевых зон между турбулизаторами для первых и глубинных секций выступов на основах анализирования результата численного вычисления на базе низкорейнольдсовых моделей Ф.Ментера**

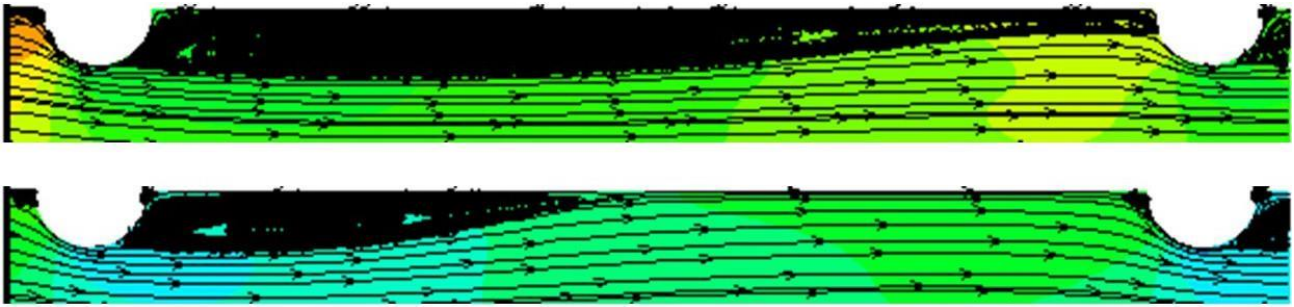
Вычисленные результаты расчётов позволили выявить, которые из секций в каналах с турбулизаторами в максимальной степени нагружены в тепловых отношениях и позволили указать эти зависимости от геометрических характеристик каналов с выступами и режимов течений теплоносителей. В данной статье ставился вопрос детерминирования непосредственно характера распределений тепловых нагрузок в секциях по всей длине канала с турбулизаторами. В дальнейшем возникает необходимость детального выявления причин, обуславливающих выявленные расчётные характеры распределений тепловых нагрузок в секциях турбулизаторов. С этой целью необходимо рассмотреть соответствующие структуры вихревых зон между турбулизаторами как для первых, так и для глубинных секций выступов на базе анализирования результата численного вычисления.

Структура вихревых зон между полукруглыми турбулизаторами для первых (верхний рисунок) и глубинных (нижний рисунок) секций показана на рис. 21 для условий  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,25$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .

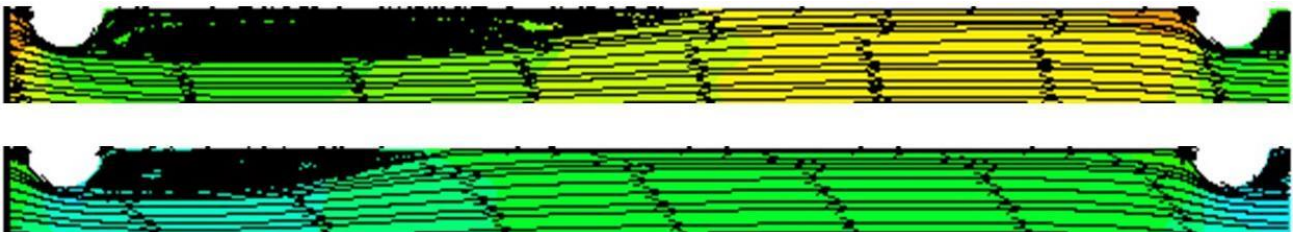


**Рис. 21. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,25$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ).**

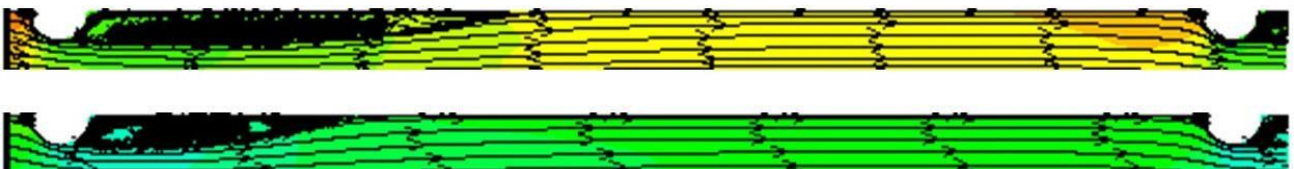
Анализ приведённых на рис. 21—30 линий тока показывает, что имеет место различие характера линий тока в круглых трубах с турбулизаторами для первоначальных и глубинных рядов.



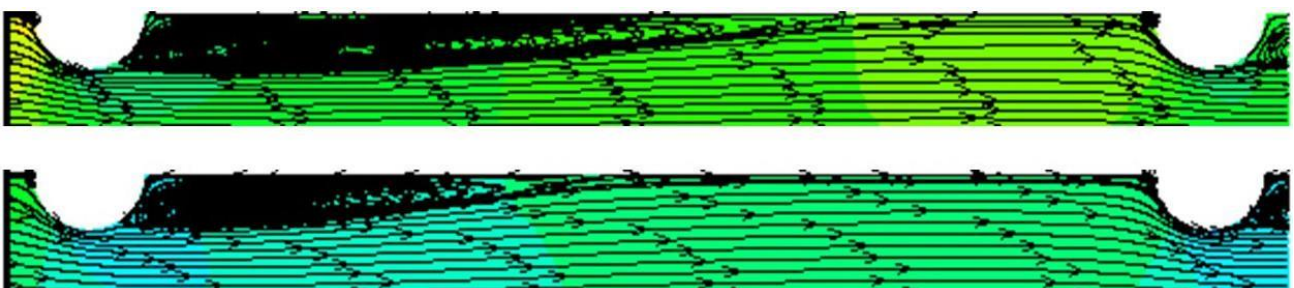
**Рис. 22. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ).**



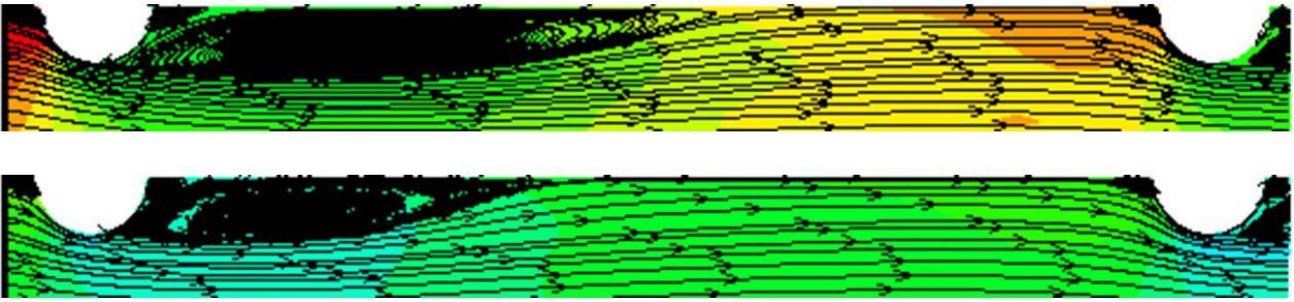
**Рис. 23. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,75$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ).**



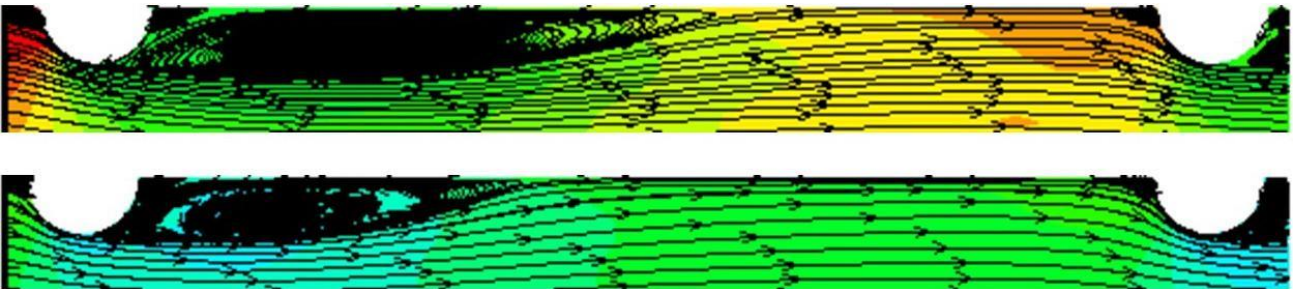
**Рис. 24. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=1,00$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ).**



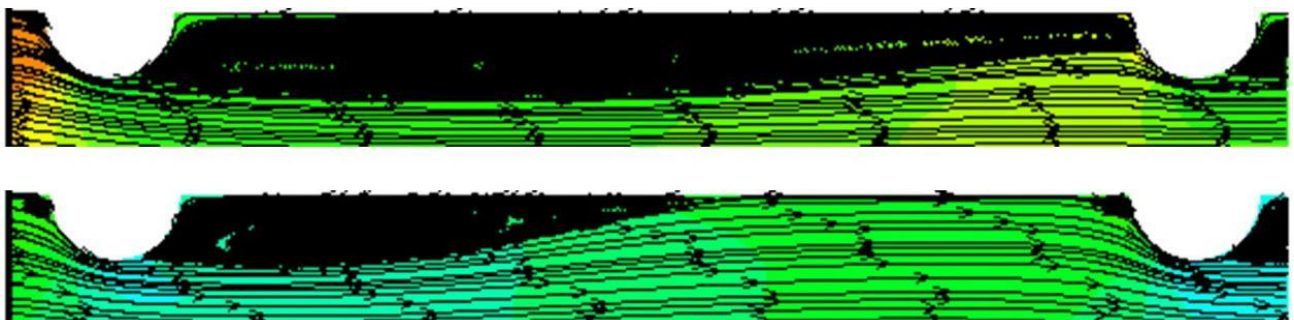
**Рис. 25. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=5 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ ).**



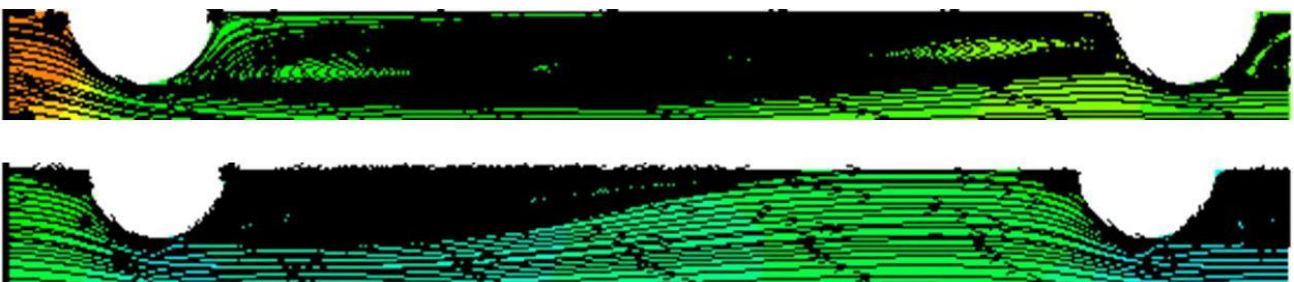
**Рис. 26. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=5 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**



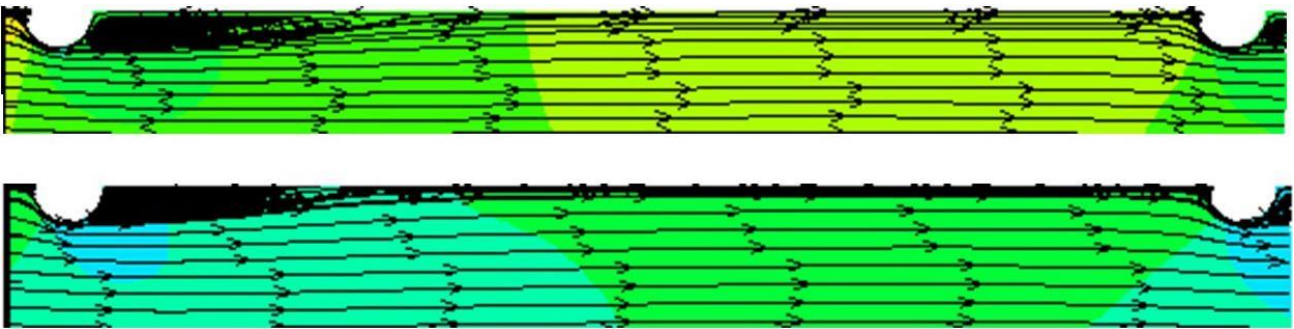
**Рис. 27. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,95$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^5$ ;  $Pr=0,72$ .**



**Рис. 28. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,94$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**



**Рис. 29. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,93$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ .**



**Рис. 30. Структуры смерчевых зон между турбулизаторами полукруглых профилей для начальных секций (верхние рисунки) и глубинных секций (нижние рисунки при условиях  $d/D=0,97$ ;  $t/D=0,50$ ;  $Re=8 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ ).**

Общий анализ позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на различие характера вихревых зон обеспечивается относительным шагом между турбулизаторами.

Для закрытых впадин (классификация [2, 7, 9—11, 13—17]), что характерно для  $t/D=0,25$ , имеет место сдвиг центра основного вихря в сторону противоположную потоку для глубинных секций по отношению к начальным секциям (рис. 21).

Для полуоткрытых впадин (характерно для  $t/D=0,50$ ) также происходит сдвиг центра основного вихря в противоположную потоку сторону, который приводит к появлению точки присоединения потока в глубинных секциях. Т.о., происходит качественное изменение основного вихря в данном случае от первоначальных до глубинных секций турбулизаторов (рис. 22, 28, 29).

Для открытых впадин (характерно для  $t/D=0,75 \div 1,00$ , а также для  $t/D=0,50$  для относительно низких высот турбулизаторов при невысоких числах О.Рейнольдса) как для первых, так и для глубинных секций турбулизаторов имеет место чисто выраженные отрывы и присоединения потока (рис. 23—27), однако, для глубинных секций точка присоединения потока смещается по отношению к первым секциям в сторону, противоположную основному потоку. Естественно, также имеет место сдвиг центра основного вихря в противоположную основному потоку сторону (рис. 23—27).

В данной статье рассматривается изотермическое течение, поэтому линии тока не зависят от числа Л.Прандтля.

Анализ представленных расчётных данных относительно линий тока между турбулизаторами для первоначальных и глубинных секций турбулизаторов (ср. рис. 22, 25—27) показывает, что увеличение критерия О.Рейнольдса при других одинаковых параметрах приводит к смещению центра основного вихря в противоположную основному потоку сторону.

Увеличения относительных высот турбулизаторов  $h/R_0$  ( $h$  — высоты турбулизаторов;  $R_0=D/2$  — радиус трубы;  $h/R_0=1-d/D$ ) при других одинаковых параметрах приводят к смещению центра основного вихря в направлении основного потока (ср. рис. 22, 28, 29); для относительно более низких турбулизаторов ( $d/D=0,97$ ;  $t/D=0,5$ ;  $Re=8 \cdot 10^3$ ;  $Pr=0,72$ ) вышеуказанное смещение центра вихря менее выражено, чем для относительно более высоких (ср. рис. 30 с рис. 22, 28, 29).

Вышеуказанное различие характера вихревых зон между первыми и глубинными секциями обуславливает отличие распределений тепловых потоков в каналах с выступами от аналогичных распределений в гладких круглых трубах при неизменных режимах течений. Максимумы тепловых нагрузок в секциях реализуются, поскольку центр вихря расположен дальше по потоку для первых секций, чем для глубинных, что и обуславливает более высокий осреднённый по секции теплообмен. Для открытых впадин это к тому же означает, что точка присоединения для первых секций турбулизаторов располагается дальше по основному потоку, чем для глубинных, но рост локального теплового потока происходит именно до точки присоединения потока, поэтому осреднённый теплообмен для первых секций турбулизаторов выше, чем для глубинных.

Следовательно, полученный в данном исследовании анализ полученных расчётным образом вихревых зон для первоначальных и глубинных секций выступов объясняет полученное несколько ранее распределение теплового потока в трубах с турбулизаторами по секциям, и его отличие от соответствующих распределений по длинам в гладких трубах.

В заключении следует отметить, что в данном исследовании приведены только характерные случаи вихревых зон в трубах с турбулизаторами, которые могут служить основой для дальнейших исследований для более широкого диапазона геометрических характеристик каналов с турбулизаторами и режимов течения теплоносителя.

### **Основные выводы**

1. Теоретическим расчётным методом были исследованы зависимости распределений локальных тепловых нагрузок, осреднённых по секциям, при конвективной теплоотдаче в каналах с поверхностными турбулизаторами циклического расположения полукруглого профиля на основе ФКОМа [3—5, 9—11, 13—15, 17], которые существенным образом зависят от геометрии каналов и режимов течений теплоносителей.
2. Вычисленные расчётные результаты показывают, что характеры распределений тепловых потоков в секциях в каналах с турбулизаторами в значительной степени отличаются от аналогичных распределений как в поперечно обтекаемом пучке труб в рядах, так и от распределений в гладких круглых трубах при неизменных режимах течений теплоносителей.
3. Расчётными методами зафиксировано, что зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от относительных шагов между выступами являются ощутимо значительными: с увеличением относительных шагов между турбулизаторами максимумы тепловых нагрузок перемещаются в районы с менее глубинными секциями.
4. Расчётными методами установлено, что зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от относительных диаметров труб с турбулизаторами являются сравнительно незначительными: с увеличением относительных диаметров диафрагм максимумы тепловых нагрузок перемещаются в районы гораздо более глубинной секции.

5. Расчётными методами было установлено, что зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от критериев О.Рейнольдса являются очень значительными: с увеличением критерия О.Рейнольдса максимумы тепловых нагрузок перемещаются в районы меньшей глубинной секции.
6. Расчётным путём установлено, что зависимости расположений максимумов тепловых нагрузок от критерия Л.Прандтля в канале с турбулизаторами являются относительно незначительными: с увеличением критериев Л.Прандтля максимумы тепловых нагрузок перемещаются в районы меньшей глубинной секции.
7. Вышепредставленное анализирование детерминирует, что на расположение максимумов относительных тепловых потоков  $q/q_{max}$  ( $Nu/Nu_{max}$ ) наибольшие влияния оказывают относительные шаги между выступами  $t/D$  и критерий О.Рейнольдса  $Re$ .
8. Законы распределений тепловых нагрузок в секциях в трубе с турбулизаторами особенно важен учёт при исследовании сравнительно короткого канала, где реализуются сравнительно небольшие количества секций.
9. Полученные в статье расчётные вычислительные данные позволили раскрыть, которые из секций в каналах с турбулизаторами подвержены максимальному тепловому нагружению в зависимости от геометрических параметров каналов с и режимов течения теплоносителей.
10. Полученные расчётные распределения вихревых зон между выступами для первоначальных и глубинных секций турбулизаторов даёт объяснение полученному ранее распределению тепловых потоков в каналов с турбулизаторами в секциях, а также различие последнего от аналогичного распределения тепловых потоков на начальном участке гладкой трубы.
11. Полученные закономерности могут использоваться при инженерного и научного расчёта интенсифицированного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, с целью улучшения их экологических характеристик.

#### Литература:

1. Вилемас Ю.В., Шимонис В.М., Адомайтис И.–Э.Й. Интенсификация теплообмена в газоохлаждаемых каналах. — Вильнюс: Мокслас, 1989. — 258 с.
2. Вихревая интенсификация конвективного теплообмена при турбулентном течении воздуха и масла в трубах и каналах с периодическими элементами дискретной шероховатости / С.А.Исаев, И.Е.Лобанов, О.А.Бояркина и др. // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. — М.: МЭИ, 2010. — С. 84—87.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43. — № 2. — С. 223—230.
4. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. — 2004. — Т. 11. — № 2. — С. 28—35.
5. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и

- специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. — М.: МЭИ, 2003. — Т. 1. — С. 57—60.
6. Жукаускас А.А. Конвективный теплообмен в теплообменниках. — М.: Наука, 1982. — 472 с.
7. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей / С.А.Исаев, П.А.Баранов, И.Е.Лобанов и др. // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — С. 66.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
9. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. — Минск, 2008. — Т. 1. — С. 101—103.
10. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. — М., 2005. — 632 с.
11. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. — 2012. — Т. 24. — № 7. — С. 45—58.
12. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей с переменными физическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. — М.: Изд-во МЭИ, 2002. — С. 144—147.
13. Лобанов И.Е. Структура вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Электронный научный журнал "Исследования технических наук". — 2012. — Май. — Выпуск 4. — Том 2. — С. 18—24.
14. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование кинетической энергии турбулентных пульсаций и её составляющих в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. — 2013. — № 1. — С. 23—30.
15. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. — 2011. — № 12. — С. 4—15.
16. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: Издательство МАИ, 2011. — 160 с.
17. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: МГАКХиС, 2010. — 288 с.
18. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И.Леонтьева. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. — 683 с.

19. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В.Ермишина и С.А.Исаева. — М.–СПб, 2001. — 360 с.
20. Численное исследование струйно-вихревого механизма интенсификации теплообмена в окрестности сферической лунки на плоскости при обтекании её потоком несжимаемой вязкой жидкости с учётом влияния асимметрии формы, естественной конвекции и нестационарных процессов / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, А.Е.Усачов и др. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен — М.: Изд-во МЭИ, 1998. — С. 121—124.
21. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев и др. — СПб: Судостроение, 2005. — 398 с.
22. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / А.Д.Госмен, В.М.Пан, А.К.Ранчел и др. — М.: Мир, 1986. — 234 с.
23. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З.Копп и др. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.
24. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. — М.: Высшая школа, 1988. — 479 с.
25. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. — 1994. — V. 32. — № 8. — P. 1598.