

**Электронный периодический
рецензируемый
научный журнал**

«SCI-ARTICLE.RU»

<http://sci-article.ru>

№121 (сентябрь) 2023

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДКОЛЛЕГИЯ.....3

**ГОЛУБЕВ ВЛАДИМИР КОНСТАНТИНОВИЧ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ
ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ТРОТИЛА ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИЗ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА.....11**

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.

Барабанов 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.

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, МАНОИ, 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-Хоразми.

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.

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 биорганической 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.

Розыходжаева Гульнора Ахмедовна. Доктор медицинских наук, руководитель клинко-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 (ЕАСРР), 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 Дуствобоевич. 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 кафедры 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 контрастного 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.

Середа 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).

Физика, Химия

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ТРОТИЛА ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИЗ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Голубев Владимир Константинович

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

Ключевые слова: тротил; продукты детонации; уравнение состояния JWL; эксперимент; термохимический расчет; программа Explo5

Keywords: trotyl; detonation products; JWL equation of state; experiment; thermochemical calculation; Explo5 program

Аннотация: Представлены результаты сопоставления вариантов уравнения состояния JWL продуктов детонации тротила, полученных в результате взрывных экспериментов и термохимических расчетов. В качестве сопоставляемых объектов использовались изэнтропы расширения продуктов детонации, в которые входят все определяющие параметры указанного уравнения состояния. Сопоставлялись между собой несколько экспериментальных изэнтроп расширения, представленных разными авторами. Сопоставлялись также несколько расчетных изэнтроп, построенных с использованием уравнений состояния BKWN, BKWN-M и JWL. Во всех случаях отмечалось довольно незначительные различие сопоставляемых кривых в плоскости координат удельный объем – давление. В конечном итоге проводилось сопоставление непосредственно экспериментальных и расчетных изэнтроп для одинаковых исходных плотностей тротила. Отмечена примерно равнозначная возможность использования обоих вариантов уравнения состояния JWL в прикладных газодинамических расчетах.

Abstract: The results of a comparison of variants of the JWL equation of state of TNT detonation products obtained as a result of explosive experiments and thermochemical calculations are presented. The expansion isentropes of detonation products, which include all the defining parameters of the specified equation of state, were used as comparable objects. Several experimental expansion isentropes presented by different authors were compared with each other. Several calculated isentropes constructed using the BKWN, BKWN-M and JWL equations of state were also compared. In all cases, rather insignificant differences in the compared curves in the specific volume – pressure coordinate plane were noted. Ultimately, a comparison was made between directly experimental and calculated isentropes for the same initial TNT densities. An approximately equivalent possibility of using both variants of the JWL equation of state in applied gas-dynamic calculations has been noted.

УДК 536.71:544.454.3

Введение

Тротил (тринитротолуол, тол, TNT) – одно из наиболее распространённых, используемых в течение длительного времени и широко изученных бризантных взрывчатых веществ (ВВ). Его различные свойства можно найти в большом числе литературных источников, однако первоначально укажем только на первый том фундаментального труда по физике взрыва [1].

Как указывается в этой же работе [1] при моделировании детонационных процессов наиболее распространённой на сегодняшний день (и наиболее рациональной) формой уравнения состояния, позволяющей с высокой точностью описывать свойства продуктов детонации в различных тестах и имеющей к тому же чрезвычайно широкую базу исходных данных для различных ВВ, является уравнение состояния Джонса-Уилкинса-Ли (JWL). Изэнтропа расширения продуктов детонации для этого уравнения состояния имеет вид

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

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

Для определения указанных подгоночных параметров уравнения состояния прежде всего берут известные экспериментальные значения свойств ВВ в точке Жуге и далее подбирают эти параметры на основе решения модельной задачи таким образом, чтобы закон движения медной цилиндрической оболочки, полученный путем численного двумерного газодинамического расчета, совпадал с экспериментальным законом движения этой оболочки до значения $V = 7$. Экспериментальный закон движения определяется с помощью скоростной фоторегистрации разлета медной трубки по схеме эксперимента, известной как цилиндр-тест. Особенности такого рода эксперимента показаны на рис. 1, взятом из работы [2].

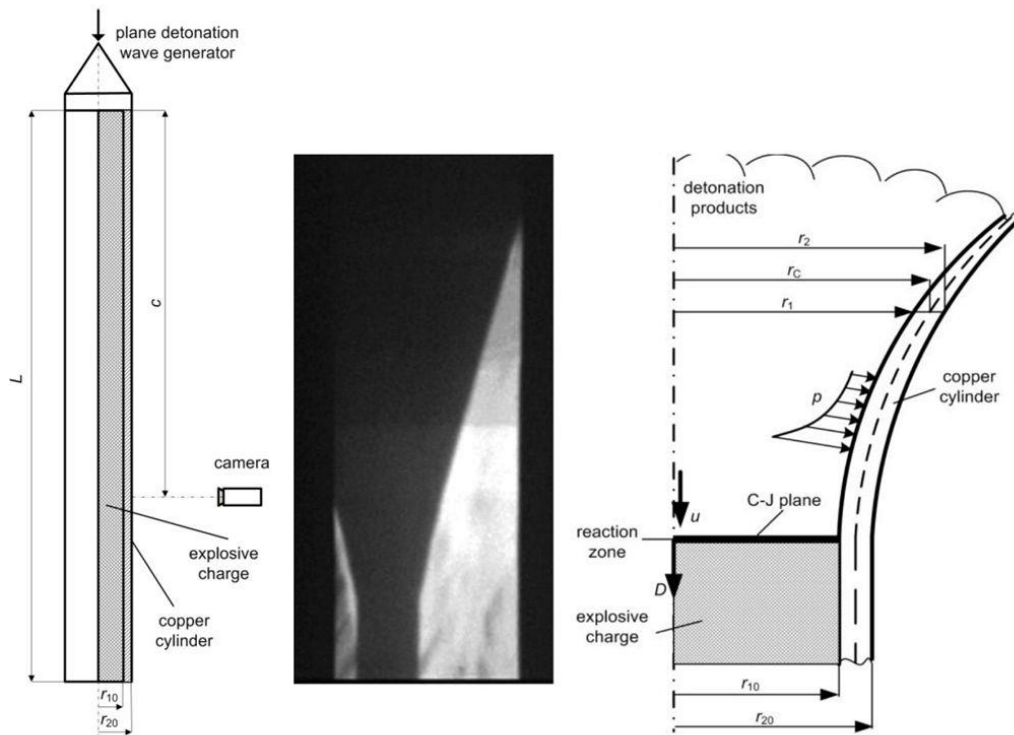


Рис. 1. Постановка опыта по распространению детонации в медной трубке, экспериментальная регистрация разлета трубки и геометрическая и физическая схема процесса [2].

Первоначальные результаты в виде параметров уравнения состояния JWL, полученные основоположниками этого метода для тротила, приведены в работах [3-5]. Эти результаты сохранили свою актуальную серьезную значимость до настоящего времени. Так, результаты [4] приводятся в фундаментальном справочнике по свойствам ВВ [6], а параметры уравнения состояния из работ [3, 4] предлагаются для использования в библиотеке уравнений состояния программы Ansys Autodyn [7]. Полученные позже таким же образом дополнительные данные по уравнению состояния JWL для тротила приводятся в ряде последующих работ, но каких-либо существенных изменений и нововведений здесь не просматривается. В частности можно только отметить обзор [8], где указывается, что наиболее строго обоснованный подбор параметров уравнения состояния JWL представлен в работе [9].

В настоящее время параметры уравнения состояния JWL могут быть получены независимым образом с использованием методов термохимического и термодинамического расчета. В частности автором для подобных целей используется термохимическая компьютерная программа Explot5 [10-11]. Некоторые результаты по определению параметров уравнения состояния JWL для тротила приводились автором в предшествующей работе [12]. Представляет определенный интерес вопрос, насколько хорошо согласуются для тротила уравнения состояния в форме JWL, полученные этими двумя, существенно различными методами. Выяснению этого вопроса и посвящена прежде всего данная работа.

Кроме того, представилось целесообразным сопоставить это основное, наиболее широко используемое уравнение состояния JWL с также приведенным в работе [1], несколько более простым уравнением состояния, известным как упрощенное уравнение состояния Зубарева. Изэнтропа расширения продуктов детонации для этого уравнения состояния имеет вид

$$P = D \exp(-kV) + EV^{-\gamma} \quad (2)$$

Экспериментально полученные результаты по определению параметров этого уравнения состояния для тротила приведены в работе [15].

Результаты расчетов

В данной работе для расчетов детонационных характеристик тротила была использована программа термохимических расчетов Expro5 [10, 11]. Расчет процесса детонации основан на стационарной модели химического равновесия детонации, а равновесный состав продуктов детонации рассчитывается с применением модифицированного метода минимизации свободной энергии.

Для описания продуктов детонации в расчетах используется уравнение состояния Беккера-Кистяковского-Уилсона (BKW) в двух его формах: в стандартной форме (BKWN)

$$PV/RT = 1 + x e^{\beta x} = f(x)$$

и в модифицированной форме (BKWN-M)

$$PV/RT = 1 + x^{\varepsilon} e^{\beta x} = f(x)$$

Смысл параметров уравнения состояния и их значения приводятся в указанном мануале [11], а также в предшествующей работе автора по изучению свойств тротила [12]. Значения этих параметров для обеих форм уравнения приводятся для сравнения в табл. 1.

Табл. 1. Наборы параметров для обеих форм уравнения состояния BKW

| Parameters | BKWN | BKWN-M |
|---------------|------|--------|
| α | 0.50 | 0.50 |
| β | 0.38 | 0.154 |
| κ | 9.41 | 9.45 |
| ε | - | 1.54 |
| θ | 4250 | 3765 |

Полные термохимические и термодинамические расчеты выполнялись прежде всего для тротила двух плотностей ρ_0 : 1.648 г/см³ – плотность кристаллического тротила при нормальных условиях, приведенная в работе [13] и 1.630 г/см³ – плотность тротила, используемого в экспериментальных работах по получению параметров уравнения состояния JWL [3, 4]. Для стандартной энтальпии образования $\Delta_f H_s^\circ$ использовалось рекомендуемое в работе [14] значение -63.2 кДж/моль. В расчетах использовались обе формы уравнения состояния BKW. Полученные таким

образом параметры уравнения состояния продуктов детонации JWL тротила представлены в табл. 2. Здесь D и P - скорость и давление детонации, а Q - теплота взрыва. Добавим, что изэнтропа расширения продуктов детонации для этого уравнения состояния описывается выражением (1).

Табл. 2. Параметры уравнения состояния продуктов детонации JWL и свойства тротила двух плотностей при расчете с использованием обеих форм уравнения состояния BKW

| Coefficients | BKWN | | BKWN-M | |
|------------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| | A , GPa | 300.799 | 294.131 | 335.056 |
| B , GPa | 6.4538 | 6.4068 | 13.5624 | 8.7230 |
| C , GPa | 1.3996 | 1.3873 | 1.0879 | 1.0811 |
| R_1 | 4.0448 | 4.0583 | 4.2922 | 4.0763 |
| R_2 | 1.1804 | 1.1826 | 1.4876 | 1.2979 |
| ω | 0.4214 | 0.4206 | 0.3508 | 0.3505 |
| ρ_0 , g/cm ³ | 1.6480 | 1.6300 | 1.6480 | 1.6300 |
| D , m/s | 6830.1 | 6773.2 | 6900.7 | 6846.7 |
| Q , kJ/kg | -4365.5 | -4351.8 | -4332.3 | -4317.3 |
| P , GPa | 18.550 | 18.217 | 19.146 | 18.885 |

Изэнтропы расширения продуктов детонации тротила плотностью 1.648 г/см³ приведены в табл. 3 в представлении уравнений состояния BKW и JWL. Здесь индексы при расчетных значениях давления P соответствуют следующим уравнениям состояния: n – BKWN, m – BKWN-M, n_j – JWL на основе BKWN, m_j – JWL на основе BKWN. С целью более аккуратного сопоставления приведены также относительные значения давлений на изэнтропах для указанных уравнений состояния. Подобные же результаты для тротила плотностью 1.630 г/см³ приведены в табл. 4.

Табл.3. Изэнтропы расширения продуктов детонации тротила плотностью 1.648 г/см³ в представлении уравнений состояния ВКВ и JWЛ

| V | P_n GPa | P_m GPa | P_m/P_n | P_{nj} GPa | P_{mj} GPa | P_{mj}/P_{nj} |
|-------------|--------------|--------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.7587(60)* | 18.5504 | 19.1463 | 1.0321 | 18.6873 | 19.1463 | 1.0246 |
| 0.8536 | 13.9054 | 13.2630 | 0.9538 | 13.6313 | 13.2630 | 0.9730 |
| 0.8963 | 11.9914 | 12.2753 | 1.0237 | 11.8882 | 12.2753 | 1.0326 |
| 0.9411 | 10.3065 | 10.5563 | 1.0242 | 10.3348 | 10.5563 | 1.0214 |
| 0.9882 | 8.8723 | 9.0850 | 1.0240 | 8.9593 | 9.0850 | 1.0140 |
| 1.0376 | 7.6494 | 7.8267 | 1.0232 | 7.7491 | 7.8267 | 1.0100 |
| 1.0895 | 6.6051 | 6.7492 | 1.0218 | 6.6910 | 6.7492 | 1.0087 |
| 1.1439 | 5.7121 | 5.8258 | 1.0199 | 5.7715 | 5.8258 | 1.0094 |
| 1.2011 | 4.9474 | 5.0338 | 1.0175 | 4.9770 | 5.0338 | 1.0114 |
| 1.2612 | 4.2919 | 4.3541 | 1.0145 | 4.2942 | 4.3541 | 1.0140 |
| 1.3243 | 3.7295 | 3.7706 | 1.0110 | 3.7099 | 3.7706 | 1.0163 |
| 1.3905 | 3.2465 | 3.2694 | 1.0071 | 3.2120 | 3.2694 | 1.0179 |
| 1.4600 | 2.8313 | 2.8389 | 1.0027 | 2.7886 | 2.8389 | 1.0180 |
| 1.5330 | 2.4741 | 2.4690 | 0.9979 | 2.4293 | 2.4690 | 1.0163 |
| 1.6096 | 2.1664 | 2.1509 | 0.9928 | 2.1241 | 2.1509 | 1.0126 |
| 1.6901 | 1.9011 | 1.8678 | 0.9825 | 1.8647 | 1.8678 | 1.0017 |
| 1.7746 | 1.6646 | 1.6262 | 0.9769 | 1.6433 | 1.6262 | 0.9896 |
| 1.8634 | 1.4617 | 1.4196 | 0.9712 | 1.4536 | 1.4196 | 0.9766 |
| 1.9565 | 1.2870 | 1.2424 | 0.9653 | 1.2900 | 1.2424 | 0.9631 |
| 2.0544 | 1.1363 | 1.0903 | 0.9595 | 1.1481 | 1.0903 | 0.9496 |
| 2.1571 | 1.0058 | 0.9592 | 0.9537 | 1.0240 | 0.9592 | 0.9367 |
| 2.2649 | 0.8926 | 0.8461 | 0.9479 | 0.9148 | 0.8461 | 0.9249 |
| 2.3782 | 0.7940 | 0.7482 | 0.9423 | 0.8181 | 0.7482 | 0.9145 |
| 2.4971 | 0.7080 | 0.6633 | 0.9369 | 0.7321 | 0.6633 | 0.9061 |
| 2.6219 | 0.6328 | 0.5896 | 0.9317 | 0.6553 | 0.5896 | 0.8997 |
| 3.3036 | 0.3824 | 0.3484 | 0.9111 | 0.3872 | 0.3485 | 0.8999 |
| 4.1626 | 0.2408 | 0.2165 | 0.8991 | 0.2318 | 0.2165 | 0.9340 |
| 5.2449 | 0.1569 | 0.1404 | 0.8948 | 0.1459 | 0.1404 | 0.9623 |
| 6.6085 | 0.1052 | 0.0945 | 0.8983 | 0.0982 | 0.0945 | 0.9620 |
| 8.3268 | 0.0721 | 0.0654 | 0.9071 | 0.0692 | 0.0654 | 0.9461 |
| 10.498 | 0.0503 | 0.0463 | 0.9205 | 0.0496 | 0.0463 | 0.9346 |
| 13.220 | 0.0357 | 0.0334 | 0.9356 | 0.0357 | 0.0334 | 0.9352 |
| 16.657 | 0.0256 | 0.0243 | 0.9492 | 0.0257 | 0.0243 | 0.9478 |
| 24.485 | 0.0150 | 0.0147 | 0.9800 | 0.0149 | 0.0147 | 0.9872 |
| 35.993 | 0.0090 | 0.0090 | 1.0000 | 0.0086 | 0.0090 | 1.0431 |
| 52.910 | 0.0054 | 0.0055 | 1.0185 | 0.0050 | 0.0055 | 1.1107 |
| 77.778 | 0.0033 | 0.0034 | 1.0303 | 0.0029 | 0.0034 | 1.1882 |
| 114.334 | 0.0020 | 0.0021 | 1.0500 | 0.0017 | 0.0021 | 1.2711 |
| 168.071 | 0.0012 | 0.0013 | 1.0833 | 0.0010 | 0.0013 | 1.3542 |
| 247.064 | 0.0008 | 0.0008 | 1.0000 | 0.0006 | 0.0008 | 1.4464 |

* 0.7560 – соответствует уравнению ВКВN-M.

Табл. 4. Изэнтропы расширения продуктов детонации тротила плотностью 1.630 г/см³ в представлении уравнений состояния BKW и JWL

| V | P_n GPa | P_m GPa | P_m/P_n | P_{nj} GPa | P_{mj} GPa | P_{mj}/P_{nj} |
|-------------|--------------|--------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.7564(28)* | 18.2172 | 18.8853 | 1.0367 | 18.3408 | 18.9375 | 1.0325 |
| 0.8532 | 13.5455 | 13.6025 | 1.0042 | 13.2930 | 13.5645 | 1.0204 |
| 0.8959 | 11.6912 | 11.9755 | 1.0243 | 11.5961 | 11.8325 | 1.0204 |
| 0.9407 | 10.0564 | 10.3026 | 1.0245 | 10.0840 | 10.2881 | 1.0202 |
| 0.9877 | 8.6636 | 8.8722 | 1.0241 | 8.7454 | 8.9197 | 1.0199 |
| 1.0371 | 7.4747 | 7.6476 | 1.0231 | 7.5677 | 7.7146 | 1.0194 |
| 1.0890 | 6.4587 | 6.5984 | 1.0216 | 6.5382 | 6.6600 | 1.0186 |
| 1.1434 | 5.5891 | 5.6986 | 1.0196 | 5.6435 | 5.7424 | 1.0175 |
| 1.2006 | 4.8438 | 4.9263 | 1.0170 | 4.8704 | 4.9483 | 1.0160 |
| 1.2606 | 4.2046 | 4.2631 | 1.0139 | 4.2058 | 4.2646 | 1.0140 |
| 1.3237 | 3.6557 | 3.6936 | 1.0104 | 3.6370 | 3.6785 | 1.0114 |
| 1.3898 | 3.1841 | 3.2041 | 1.0063 | 3.1520 | 3.1778 | 1.0082 |
| 1.4593 | 2.7785 | 2.7836 | 1.0018 | 2.7394 | 2.7512 | 1.0043 |
| 1.5323 | 2.4293 | 2.4221 | 0.9970 | 2.3889 | 2.3880 | 0.9996 |
| 1.6089 | 2.1284 | 2.1111 | 0.9919 | 2.0910 | 2.0789 | 0.9942 |
| 1.6894 | 1.8688 | 1.8343 | 0.9815 | 1.8374 | 1.8155 | 0.9881 |
| 1.7738 | 1.6445 | 1.5980 | 0.9717 | 1.6208 | 1.5903 | 0.9812 |
| 1.8625 | 1.4447 | 1.3958 | 0.9662 | 1.4349 | 1.3972 | 0.9737 |
| 1.9557 | 1.2727 | 1.2224 | 0.9605 | 1.2744 | 1.2306 | 0.9657 |
| 2.0534 | 1.1241 | 1.0732 | 0.9547 | 1.1348 | 1.0863 | 0.9572 |
| 2.1561 | 0.9954 | 0.9447 | 0.9491 | 1.0127 | 0.9605 | 0.9484 |
| 2.2639 | 0.8837 | 0.8338 | 0.9435 | 0.9051 | 0.8503 | 0.9394 |
| 2.3771 | 0.7864 | 0.7377 | 0.9381 | 0.8098 | 0.7533 | 0.9303 |
| 2.4960 | 0.7014 | 0.6544 | 0.9330 | 0.7248 | 0.6677 | 0.9212 |
| 2.6208 | 0.6271 | 0.5819 | 0.9279 | 0.6489 | 0.5920 | 0.9123 |
| 3.3022 | 0.3794 | 0.3446 | 0.9083 | 0.3837 | 0.3359 | 0.8754 |
| 4.1607 | 0.2391 | 0.2145 | 0.8971 | 0.2298 | 0.1971 | 0.8575 |
| 5.2425 | 0.1559 | 0.1393 | 0.8935 | 0.1448 | 0.1251 | 0.8635 |
| 6.6056 | 0.1045 | 0.0938 | 0.8976 | 0.0975 | 0.0861 | 0.8828 |
| 8.3230 | 0.0717 | 0.0650 | 0.9066 | 0.0687 | 0.0620 | 0.9021 |
| 10.487 | 0.0500 | 0.0461 | 0.9220 | 0.0493 | 0.0453 | 0.9186 |
| 13.214 | 0.0354 | 0.0332 | 0.9379 | 0.0355 | 0.0331 | 0.9340 |
| 16.649 | 0.0254 | 0.0242 | 0.9528 | 0.0255 | 0.0242 | 0.9491 |
| 24.474 | 0.0149 | 0.0146 | 0.9799 | 0.0148 | 0.0144 | 0.9749 |
| 35.977 | 0.0089 | 0.0089 | 1.0000 | 0.0085 | 0.0086 | 1.0023 |
| 52.886 | 0.0054 | 0.0055 | 1.0185 | 0.0049 | 0.0051 | 1.0304 |
| 77.743 | 0.0033 | 0.0034 | 1.0303 | 0.0029 | 0.0030 | 1.0559 |
| 114.282 | 0.0020 | 0.0021 | 1.0500 | 0.0017 | 0.0018 | 1.0909 |
| 167.995 | 0.0012 | 0.0013 | 1.0833 | 0.0010 | 0.0011 | 1.1146 |
| 246.952 | 0.0008 | 0.0008 | 1.0000 | 0.0006 | 0.0006 | 1.1455 |

* 0.7528 – соответствует уравнению BKWN-M

С целью более аккуратного сопоставления на рис. 2, 3 приведены также относительные значения давлений P_n/P_m и P_{nj}/P_{mj} на изэнтропах для указанных уравнений состояния тротила плотностью 1.630 г/см³.

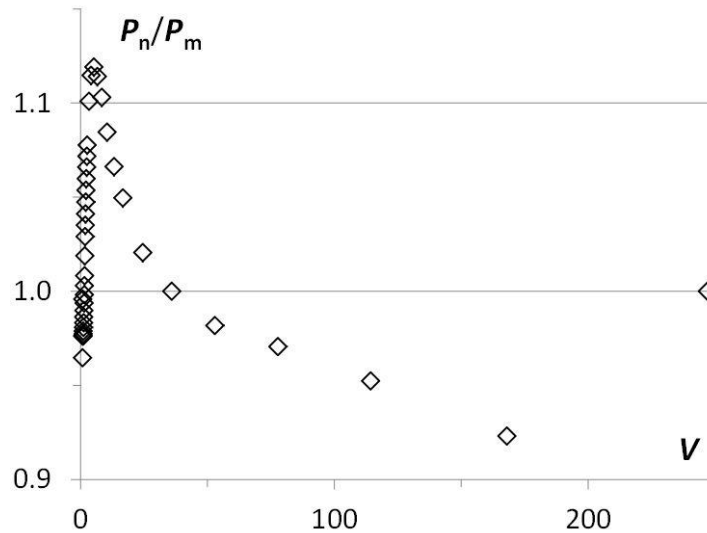


Рис. 2. Влияние удельного объема продуктов детонации на отношение P_n/P_m тротила плотностью 1.630 г/см^3 .

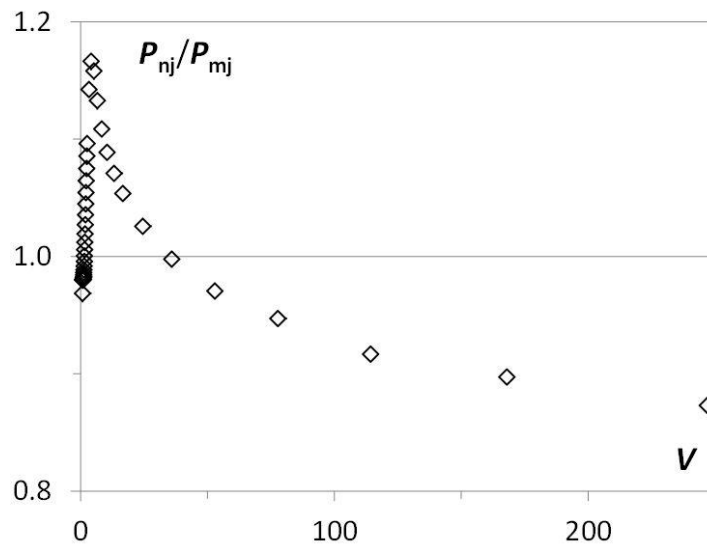


Рис. 3. Влияние удельного объема продуктов детонации на отношение P_{nj}/P_{mj} тротила плотностью 1.630 г/см^3 .

Полученные экспериментально параметры уравнения состояния продуктов детонации JWL тротила, приведенные в работах [3-5, 8], представлены в табл. 5. Здесь E_0 – полная энергия взрывчатого вещества, связанная с его теплотой взрыва.

Табл. 5. Параметры уравнения состояния продуктов детонации JWL и свойства тротила, полученные в указанных работах с использованием метода разлета медной трубки

| Coefficients | [3] | [4] | [5] | [8] |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| A , GPa | 371.210 | 373.800 | 524.409 | 565.442 |
| B , GPa | 3.2305 | 3.7470 | 4.9001 | 6.5631 |
| C , GPa | 1.0454 | 0.7340 | 0.6261 | 1.2013 |
| R_1 | 4.1500 | 4.1500 | 4.5790 | 4.8490 |
| R_2 | 0.9500 | 0.9000 | 0.8500 | 1.1510 |
| ω | 0.3000 | 0.3500 | 0.2300 | 0.3200 |
| ρ_0 , g/cm ³ | 1.630 | 1.630 | 1.632 | 1.620 |
| D , m/s | 6930 | 6930 | 7070 | 6920 |
| E_0 , kJ/cm ³ | 7.000 | 6.000 | 7.100 | 7.040 |
| P , GPa | 21.00 | 21.00 | 20.50 | 19.20 |

Изэнтропы расширения продуктов детонации тротила, полученные в работах [3-5, 8], приведены в табл. 6. Здесь индексы e1-e4 при экспериментальных значениях давления P соответствуют указанной последовательности цитируемых работ. Для сравнения приведены также расчетные значения давления P_{mj} из табл. 4.

Табл. 6. Изэнтропы расширения продуктов детонации тротила, полученные в работах [3-5, 8] с использованием метода разлета медной трубки

| V | P_{mj} | P_{e1} | P_{e2} | P_{e3} | P_{e4} |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | GPa | | |
| 0.7528 | 18.9375 | 19.4164 | 19.4282 | 20.1685 | 19.1986 |
| 0.8532 | 13.5645 | 13.4830 | 13.4940 | 13.6770 | 12.9686 |
| 0.8959 | 11.8325 | 11.5992 | 11.6103 | 11.6756 | 11.0696 |
| 0.9407 | 10.2881 | 9.9383 | 9.9496 | 9.9403 | 9.4321 |
| 0.9877 | 8.9197 | 8.4847 | 8.4963 | 8.4472 | 8.0300 |
| 1.0371 | 7.7146 | 7.2200 | 7.2319 | 7.1702 | 6.8356 |
| 1.0890 | 6.6600 | 6.1285 | 6.1408 | 6.0870 | 5.8252 |
| 1.1434 | 5.7424 | 5.1958 | 5.2085 | 5.1767 | 4.9773 |
| 1.2006 | 4.9483 | 4.4022 | 4.4152 | 4.4145 | 4.2669 |
| 1.2606 | 4.2646 | 3.7333 | 3.7465 | 3.7815 | 3.6752 |
| 1.3237 | 3.6785 | 3.1718 | 3.1850 | 3.2568 | 3.1821 |
| 1.3898 | 3.1778 | 2.7049 | 2.7179 | 2.8248 | 2.7728 |
| 1.4593 | 2.7512 | 2.3171 | 2.3297 | 2.4679 | 2.4309 |
| 1.5323 | 2.3880 | 1.9963 | 2.0082 | 2.1730 | 2.1443 |
| 1.6089 | 2.0789 | 1.7315 | 1.7425 | 1.9283 | 1.9027 |
| 1.6894 | 1.8155 | 1.5125 | 1.5223 | 1.7233 | 1.6967 |
| 1.7738 | 1.5903 | 1.3311 | 1.3394 | 1.5500 | 1.5197 |
| 1.8625 | 1.3972 | 1.1795 | 1.1861 | 1.4013 | 1.3655 |
| 1.9557 | 1.2306 | 1.0519 | 1.0564 | 1.2716 | 1.2297 |
| 2.0534 | 1.0863 | 0.9434 | 0.9458 | 1.1572 | 1.1091 |
| 2.1561 | 0.9605 | 0.8499 | 0.8498 | 1.0543 | 1.0007 |
| 2.2639 | 0.8503 | 0.7682 | 0.7657 | 0.9610 | 0.9029 |
| 2.3771 | 0.7533 | 0.6961 | 0.6910 | 0.8754 | 0.8141 |
| 2.4960 | 0.6677 | 0.6317 | 0.6238 | 0.7962 | 0.7333 |
| 2.6208 | 0.5920 | 0.5736 | 0.5631 | 0.7228 | 0.6599 |
| 3.3022 | 0.3359 | 0.3619 | 0.3396 | 0.4401 | 0.3950 |
| 4.1607 | 0.1971 | 0.2258 | 0.1962 | 0.2511 | 0.2376 |
| 5.2425 | 0.1251 | 0.1435 | 0.1120 | 0.1385 | 0.1506 |
| 6.6056 | 0.0861 | 0.0959 | 0.0673 | 0.0793 | 0.1027 |
| 8.3230 | 0.0620 | 0.0677 | 0.0441 | 0.0504 | 0.0737 |
| 10.487 | 0.0453 | 0.0494 | 0.0310 | 0.0354 | 0.0540 |
| 13.214 | 0.0331 | 0.0365 | 0.0225 | 0.0262 | 0.0398 |
| 16.649 | 0.0242 | 0.0270 | 0.0165 | 0.0197 | 0.0293 |
| 24.474 | 0.0144 | 0.0164 | 0.0098 | 0.0123 | 0.0176 |
| 35.977 | 0.0086 | 0.0099 | 0.0058 | 0.0076 | 0.0106 |
| 52.886 | 0.0051 | 0.0060 | 0.0035 | 0.0048 | 0.0064 |
| 77.743 | 0.0030 | 0.0036 | 0.0021 | 0.0030 | 0.0038 |
| 114.282 | 0.0018 | 0.0022 | 0.0012 | 0.0018 | 0.0023 |
| 167.995 | 0.0011 | 0.0013 | 0.0007 | 0.0011 | 0.0014 |
| 246.952 | 0.0006 | 0.0008 | 0.0004 | 0.0007 | 0.0008 |

Результаты табл. 6 показаны графически на рис. 4 во всем приведенном диапазоне расширения продуктов детонации. В этом диапазоне они практически неразличимы и для уточнения приведены также на рис. 5 для начального участка изэнтропы расширения и на рис. 6 в логарифмических координатах.

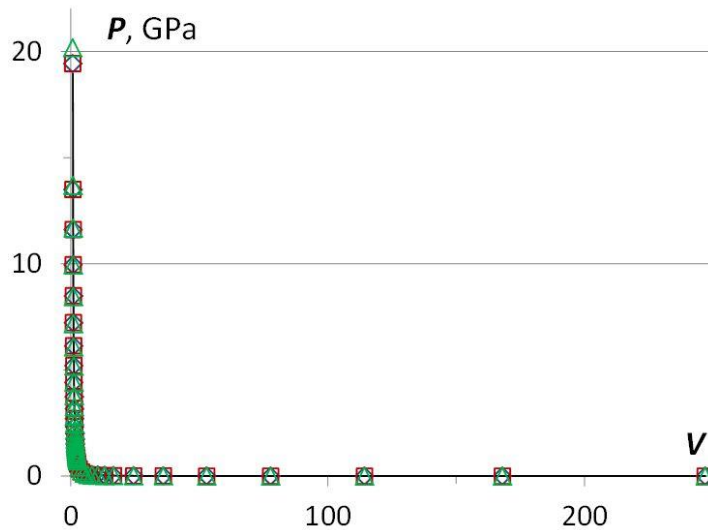


Рис. 4. Влияние удельного объема продуктов детонации на давление на изэнтропе расширения тротила по результатам работ [3-5]: ромб - P_{e1} , квадрат - P_{e2} , треугольник - P_{e3} , сплошная линия - P_{mj} .

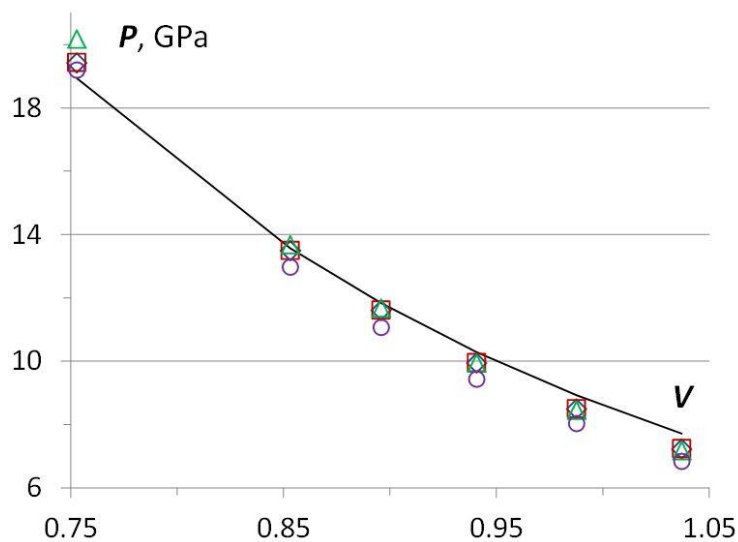


Рис. 5. Влияние удельного объема продуктов детонации на давление на начальном участке изэнтропы расширения тротила по результатам работ [3-5, 8]: ромб - P_{e1} , квадрат - P_{e2} , треугольник - P_{e3} , кружок - P_{e4} , сплошная линия - P_{mj} .

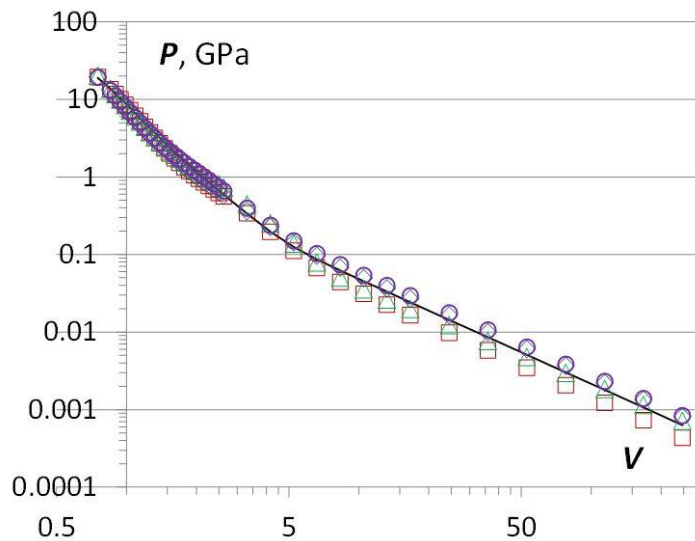


Рис. 6. Влияние удельного объема продуктов детонации на давление на изэнтропе расширения тротила в логарифмических координатах. Обозначения точек соответствуют указанным на рис. 5.

Для более детального сравнения в табл. 7 приведены относительные значения давления на экспериментальных изэнтропах расширения продуктов детонации из табл. 6. Для этого реальные экспериментальные значения P_e делятся на расчетные значения P_{mj} .

Табл. 7. Изэнтропы расширения продуктов детонации тротила, полученные в работах [3-5, 8], для относительных значений давления

| V | P_{e1}/P_{mj} | P_{e2}/P_{mj} | P_{e3}/P_{mj} | P_{e4}/P_{mj} |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.7528 | 1.0253 | 1.0259 | 1.0650 | 1.0138 |
| 0.8532 | 0.9940 | 0.9948 | 1.0083 | 0.9561 |
| 0.8959 | 0.9803 | 0.9812 | 0.9867 | 0.9355 |
| 0.9407 | 0.9660 | 0.9671 | 0.9662 | 0.9168 |
| 0.9877 | 0.9512 | 0.9525 | 0.9470 | 0.9003 |
| 1.0371 | 0.9359 | 0.9374 | 0.9294 | 0.8861 |
| 1.0890 | 0.9202 | 0.9220 | 0.9140 | 0.8747 |
| 1.1434 | 0.9048 | 0.9070 | 0.9015 | 0.8668 |
| 1.2006 | 0.8896 | 0.8923 | 0.8921 | 0.8623 |
| 1.2606 | 0.8754 | 0.8785 | 0.8867 | 0.8618 |
| 1.3237 | 0.8622 | 0.8658 | 0.8853 | 0.8651 |
| 1.3898 | 0.8512 | 0.8553 | 0.8889 | 0.8725 |
| 1.4593 | 0.8422 | 0.8468 | 0.8971 | 0.8836 |
| 1.5323 | 0.8360 | 0.8410 | 0.9100 | 0.8980 |
| 1.6089 | 0.8329 | 0.8382 | 0.9276 | 0.9152 |
| 1.6894 | 0.8331 | 0.8385 | 0.9492 | 0.9346 |
| 1.7738 | 0.8370 | 0.8422 | 0.9747 | 0.9556 |
| 1.8625 | 0.8442 | 0.8489 | 1.0029 | 0.9774 |
| 1.9557 | 0.8548 | 0.8584 | 1.0333 | 0.9992 |
| 2.0534 | 0.8685 | 0.8706 | 1.0652 | 1.0210 |
| 2.1561 | 0.8848 | 0.8848 | 1.0977 | 1.0419 |
| 2.2639 | 0.9035 | 0.9005 | 1.1302 | 1.0618 |
| 2.3771 | 0.9241 | 0.9172 | 1.1620 | 1.0807 |
| 2.4960 | 0.9461 | 0.9343 | 1.1924 | 1.0983 |
| 2.6208 | 0.9691 | 0.9513 | 1.2210 | 1.1147 |
| 3.3022 | 1.0773 | 1.0111 | 1.3104 | 1.1760 |
| 4.1607 | 1.1461 | 0.9956 | 1.2741 | 1.2056 |
| 5.2425 | 1.1474 | 0.8959 | 1.1072 | 1.2040 |
| 6.6056 | 1.1138 | 0.7811 | 0.9205 | 1.1925 |
| 8.3230 | 1.0922 | 0.7117 | 0.8125 | 1.1894 |
| 10.487 | 1.0917 | 0.6861 | 0.7831 | 1.1942 |
| 13.214 | 1.1017 | 0.6805 | 0.7924 | 1.2022 |
| 16.649 | 1.1145 | 0.6800 | 0.8130 | 1.2108 |
| 24.474 | 1.1364 | 0.6801 | 0.8516 | 1.2252 |
| 35.977 | 1.1586 | 0.6801 | 0.8919 | 1.2394 |
| 52.886 | 1.1808 | 0.6799 | 0.9338 | 1.2535 |
| 77.743 | 1.2060 | 0.6812 | 0.9799 | 1.2705 |
| 114.282 | 1.2263 | 0.6794 | 1.0235 | 1.2819 |
| 167.995 | 1.2501 | 0.6795 | 1.0720 | 1.2968 |
| 246.952 | 1.2867 | 0.6860 | 1.1335 | 1.3245 |

Сравнение полученных таким образом относительных значений давления на экспериментальных изэнтропах расширения продуктов детонации тротила выполнено на рис. 7. На рис. 8 подобное сравнение показано на начальном участке изэнтропы расширения.

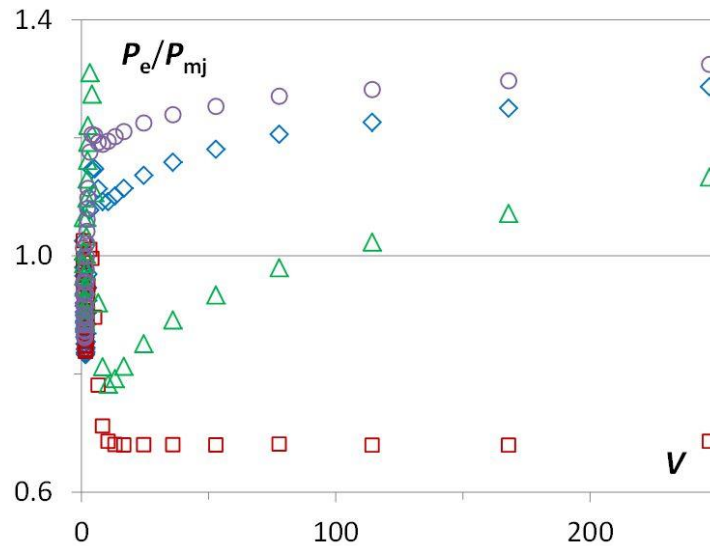


Рис. 7. Влияние удельного объема продуктов детонации на относительные положения изэнтроп расширения тротила по результатам работ [3-5, 8]: ромб - P_{e1} , квадрат - P_{e2} , треугольник - P_{e3} , кружок - P_{e4} .

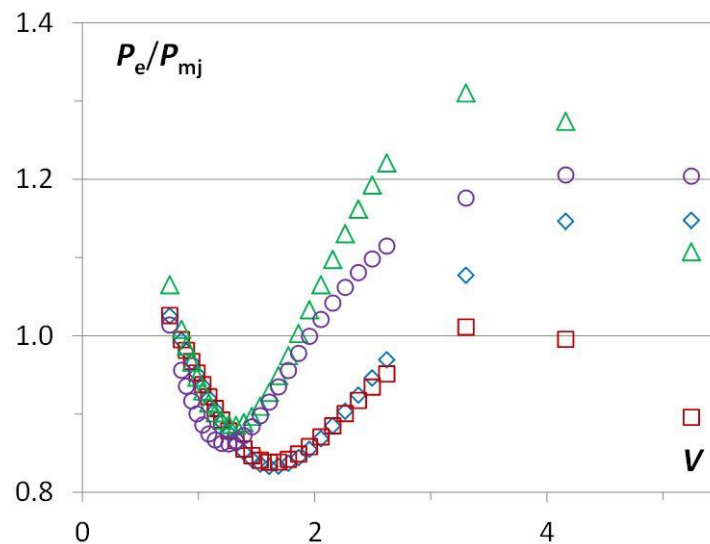


Рис. 8. Влияние удельного объема продуктов детонации на относительные положения изэнтроп расширения тротила на начальном участке расширения. Обозначения точек соответствуют указанным на рис. 7.

Изэнтропа расширения продуктов детонации тротила, полученная в работе [15] с использованием уравнения состояния Зубарева, приведена в табл. 8. Ее функциональный вид описывается выражением (2), а значения параметров приведены в работе [15]. В таблице наряду с экспериментальными значениями P_e приведены расчетные значения P_{mj} и указаны относительные значения P_e/P_{mj} . Приведенные в таблице результаты представлены также графически на рис. 9 в логарифмических координатах.

Табл. 8. Экспериментальная изэнтропа расширения продуктов детонации тротила, полученная в работе [15], и ее сопоставление с расчетной изэнтропой

| V | P_{mj} | P_e | P_e/P_{mj} |
|---------|----------|---------|--------------|
| | GPa | | |
| 0.7528 | 18.9375 | 19.7914 | 1.0451 |
| 0.8532 | 13.5645 | 13.4156 | 0.9890 |
| 0.8959 | 11.8325 | 11.4679 | 0.9692 |
| 0.9407 | 10.2881 | 9.7836 | 0.9510 |
| 0.9877 | 8.9197 | 8.3391 | 0.9349 |
| 1.0371 | 7.7146 | 7.1087 | 0.9215 |
| 1.0890 | 6.6600 | 6.0647 | 0.9106 |
| 1.1434 | 5.7424 | 5.1864 | 0.9032 |
| 1.2006 | 4.9483 | 4.4520 | 0.8997 |
| 1.2606 | 4.2646 | 3.8384 | 0.9001 |
| 1.3237 | 3.6785 | 3.3287 | 0.9049 |
| 1.3898 | 3.1778 | 2.9061 | 0.9145 |
| 1.4593 | 2.7512 | 2.5547 | 0.9286 |
| 1.5323 | 2.3880 | 2.2630 | 0.9477 |
| 1.6089 | 2.0789 | 2.0184 | 0.9709 |
| 1.6894 | 1.8155 | 1.8129 | 0.9986 |
| 1.7738 | 1.5903 | 1.6379 | 1.0299 |
| 1.8625 | 1.3972 | 1.4880 | 1.0650 |
| 1.9557 | 1.2306 | 1.3577 | 1.1032 |
| 2.0534 | 1.0863 | 1.2433 | 1.1445 |
| 2.1561 | 0.9605 | 1.1419 | 1.1888 |
| 2.2639 | 0.8503 | 1.0510 | 1.2360 |
| 2.3771 | 0.7533 | 0.9688 | 1.2860 |
| 2.4960 | 0.6677 | 0.8942 | 1.3392 |
| 2.6208 | 0.5920 | 0.8259 | 1.3953 |
| 3.3022 | 0.3359 | 0.5694 | 1.6954 |
| 4.1607 | 0.1971 | 0.3935 | 1.9967 |
| 5.2425 | 0.1251 | 0.2718 | 2.1731 |
| 6.6056 | 0.0861 | 0.1878 | 2.1815 |
| 8.3230 | 0.0620 | 0.1297 | 2.0924 |
| 10.487 | 0.0453 | 0.0896 | 1.9802 |
| 13.214 | 0.0331 | 0.0620 | 1.8713 |
| 16.649 | 0.0242 | 0.0428 | 1.7657 |
| 24.474 | 0.0144 | 0.0231 | 1.6040 |
| 35.977 | 0.0086 | 0.0125 | 1.4564 |
| 52.886 | 0.0051 | 0.0067 | 1.3212 |
| 77.743 | 0.0030 | 0.0036 | 1.2066 |
| 114.282 | 0.0018 | 0.0020 | 1.0946 |
| 167.995 | 0.0011 | 0.0011 | 0.9896 |
| 246.952 | 0.0006 | 0.0006 | 0.9077 |

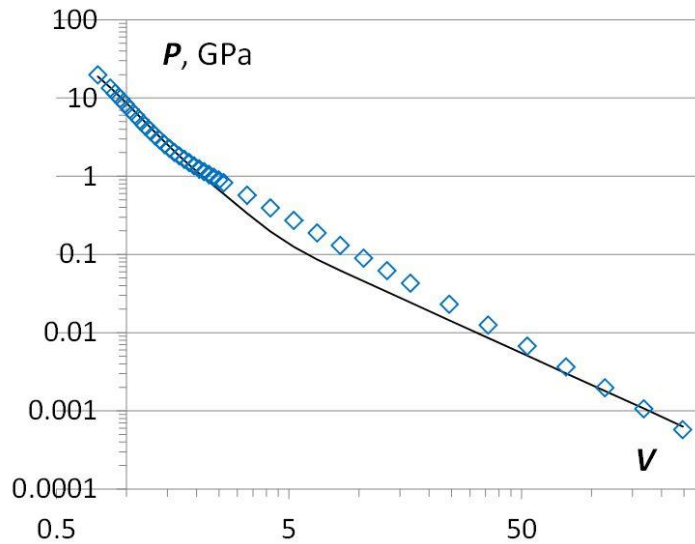


Рис. 9. Влияние удельного объема продуктов детонации на давление на изэнтропе расширения тротила по результатам работы [15] (ромб) и сопоставление этих результатов с результатом расчета P_{mj} из табл. 4 (сплошная линия).

Зависимость относительного значения давления P_e/P_{mj} от удельного объема продуктов детонации показана на рис. 10. Часть этой зависимости на начальном участке изэнтропы расширения приведена на рис. 11.

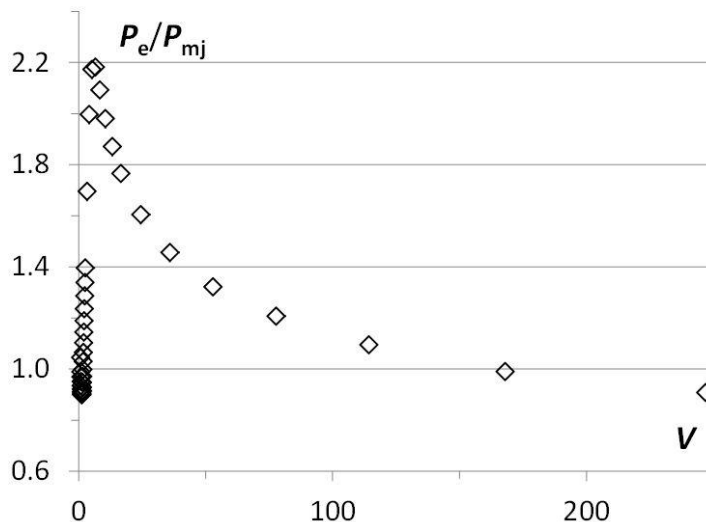


Рис. 10. Влияние удельного объема продуктов детонации на относительное положение изэнтропы расширения тротила по результатам экспериментальной работы [15].

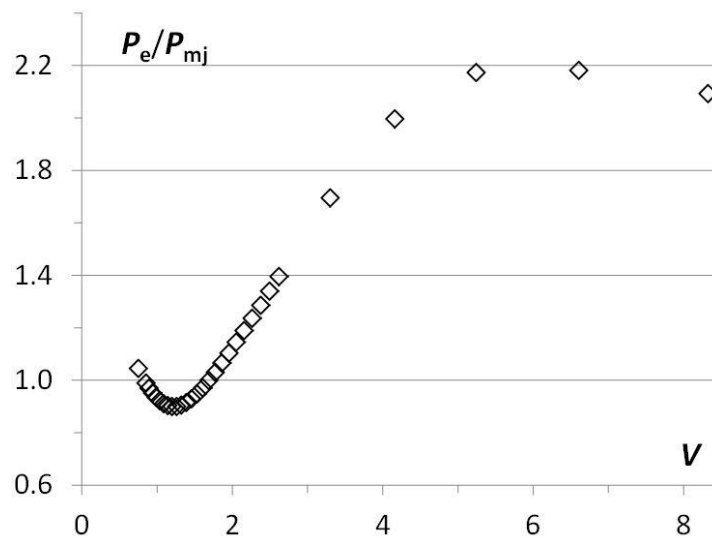


Рис. 11. Влияние удельного объема продуктов детонации на относительное положение изэнтропы расширения тротила на начальном участке расширения.

Заключение

Проведено расчетное сопоставление вариантов уравнения состояния JWL продуктов детонации тротила, полученных в результате взрывных экспериментов по разлету медной трубки, так называемый цилиндр-тест, и термодинамических расчетов с использованием термодинамической программы Expro5. Сопоставляемыми объектами являлись соответствующие этим вариантам уравнения состояния изэнтропы расширения продуктов детонации от точки Жуге до практически атмосферного давления.

Рассматривались несколько экспериментальных изэнтроп расширения, полученных и представленных разными авторами. Было показано, что все они располагаются довольно близко друг к другу в плоскости координат удельный объем – давление, хотя и характеризуются весьма различающимися наборами определяющих параметров.

Сопоставлялись между собой также расчетные изэнтропы расширения, построенные с использованием уравнений состояния BKWN и BKWN-M, а также уравнений состояния JWL полученных на основе обеих форм уравнения состояния BKW. Здесь также было отмечено близкое расположение этих изэнтроп в указанной плоскости координат.

В конечном итоге проводилось конкретное сопоставление экспериментальных и расчетных изэнтроп для одинаковых исходных плотностей тротила. Было отмечено приемлемо близкое расположение этих изэнтроп во всем рассматриваемом диапазоне изменения плотностей продуктов детонации. Может быть предположена примерно равнозначная возможность использования и экспериментального, и расчетного вариантов уравнения состояния JWL в проведении прикладных газодинамических расчетов.

В качестве дополнительного материала для тротила было выполнено сопоставление уравнения состояния продуктов детонации JWL и уравнения состояния Зубарева.

Полученные результаты для изэнтроп расширения обоих уравнений указали на их приемлемое согласие в областях высоких давлений и значительных расширений. В области же промежуточных расширений давления на изэнтропе Зубарева существенно превышают давление на изэнтропе JWL.

Литература:

1. Андреев С. Г., Бабкин А. В., Баум Ф. А., Имховик Н. А., Кобылкин И. Ф., Колпаков В. И., Ладов С. В., Одинцов В. А., Орленко Л. П., Охитин В. Н., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер В. И. Физика взрыва: Т. 1 / Ред. Л. П. Орленко – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.
2. Elek P. M., Džingalašević V. V., Jaramaz S. S., Micković D. M. Determination of detonation products equation of state from cylinder test: Analytical model and numerical analysis // *Thermal Science*. – 2015. – Vol. 19, No. 1. – P. 35-48.
3. Lee E. L., Hornig H. C., Kury J. W. Adiabatic expansion of explosive detonation products: LLNL Report UCRL-50422. – Livermore, California: University of California, Lawrence Livermore Laboratory, 1968. – 41 p.
4. Lee E., Finger M., Collins W. JWL equations of state coefficients for high explosives: LLNL Report USID-16189. – Livermore, California: University of California, Lawrence Livermore Laboratory, 1973. – 10 p.
5. Souers P. C., Kury J. W. Comparison of cylinder data and code calculations for homogeneous explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 1993. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 175-183.
6. Dobratz B. M., Crawford P. C. LLNL Explosives Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. – Livermore, California: LLNL, University of California, 1985. – 522 p.
7. Ansys Autodyn User's Manual. Release 15.0. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2013. – 492 p.
8. Валько В. В., Образ О. П., Гасилов В. А., Соловьёва В. С., Савенко Н. О. Уравнения состояния продуктов детонации взрывчатых веществ: Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2021. – № 51. – 38 с. – URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-51> (дата обращения: 08.05.2023).
9. Ермолович Е. И., Ильин В. П., Кожевников В. Г., Михайлюкова А.Н., Севастьянов А. Б. Коэффициенты уравнения состояния продуктов детонации в форме JWL для ряда взрывчатых материалов // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XI Международной конференции. – Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012. – С. 64.
10. Thermochemical Computer Code Explo5. – Bliznovice, Czech Republic: Ozm Research, 2023. URL: <https://www.ozm.cz/explosives-performance-tests/thermochemical-computer-code-explo5>.
11. Sućeska M. Explo5. Version 6.06 User's Guide. – Zagreb, Croatia, 2021. – 197 p.
12. Голубев В. К. Скорость детонации тринитротолуола в эксперименте и термохимическом расчете [Электронный ресурс] // *Sci-article.ru*. 2023. – URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1679943458> (дата обращения: 28.03.2023).
13. Fischer N., Fischer D., Klapötke T. M., Piercey D. G., Stierstorfer J. Pushing the limits of energetic materials – the synthesis and characterization of dihydroxylammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-diolate. *J. Mater. Chem.* 2012. Vol. 22, Iss. 38. P. 20418-20422.
14. Suntsova M. A., Dorofeeva O. V. Use of G4 theory for the assessment of inaccuracies in experimental enthalpies of formation of aromatic nitro compounds // *J. Chem. Eng. Data*. – 2016. – Vol. 61, Iss. 1. – P. 313-329.
15. Евстигнеев А. А., Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н. Изэнтропическое расширение

и уравнение состояния продуктов взрыва тротила // Физика горения и взрыва. – 1976.
– Т.12, №5. – С. 758-763.