

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Строительство.
Электротехника и химические технологии»**

Научный рецензируемый журнал

№ 2 (22), 2024

Тверь 2024

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2024. № 2 (22). 102 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований и экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным специальностям: 2.1.5 Строительные материалы и изделия; 2.4.4 Электротехнология и электрофизика; 2.6.10 Технология органических веществ.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74328 (печатн.) от 19 ноября 2018 г., Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ISSN 2658-7459 (печатн.)

ISSN 2686-794X (онлайн)

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал

№ 2 (22), 2024

Редактор Ю.А. Якушева

Корректор С.В. Борисов

Подписано в печать 22.11.2024

Дата выхода в свет 09.12.2024

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 12,75

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 11,86

Заказ № 274

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,09

С – 102

Редакционно-издательский центр

Тверского государственного технического университета

Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22

Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»

170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514

© Тверской государственный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Чернокожева Л.С., Томашова В.А.</i> Вопросы компьютерного моделирования расчетных сечений перекрытий эффективных форм.....	5
<i>Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Томашова В.А., Чернокожева Л.С.</i> Анализ несущей способности сечений изгибаемых железобетонных элементов с применением программных средств.....	12
<i>Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р.</i> Зависимость динамической прочности карбонатного бетона от скорости деформирования	19
<i>Куляев П.В., Сизов Ю.В.</i> Динамические свойства карбонатного бетона в условиях слабоинтенсивного ударного сжатия	25
<i>Петропавловская В.Б., Микаелян Х.А., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б.</i> Золоцементные композиции на основе золошлаковых отходов гидроудаления	33

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Максудов Д.В.</i> Оптимизация частоты питающего напряжения озонатора.....	42
<i>Макаров А.Н.</i> Расчет потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны и стен высокоомощных электродуговых сталеплавильных печей. Часть I. Теплообмен электрических дуг в ванне металла.....	51
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> Заметка об <i>n</i> -симметрии линейного стержня	63

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Белов В.В.</i> Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 1. Теоретическое обоснование метода.....	72
<i>Виноградова Е.А., Молчанов В.П., Шилова О.Г.</i> Исследование свойств и оценка реакционной способности тетраметилендиэтилететрамина.....	83
<i>Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р.</i> Определение коэффициентов поглощения в сапропеле и отражения на границе вода – сапропель с помощью гидроакустической трубы	88

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Barkaya T.R., Subbotin S.L., Chernokozheva L.S., Tomashova V.A.</i> Computer modeling issues of design sections of effective forms of floors.....	5
<i>Barkaya T.R., Subbotin S.L., Tomashova V.A., Chernokozheva L.S.</i> Analysis of load capacity of sections of bending reinforced concrete elements using software tools.....	12
<i>Belov V.V., Kulyaev P.V., Barkaya T.R.</i> Dependence of the impact strength of carbonate concrete on the strain rate.....	19
<i>Kulyaev P.V., Sizov Yu.V.</i> Dynamic properties of carbonate concrete under low-intensity impact compression	25
<i>Petropavlovskaya V.B., Mikaelyan Kh.A., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B.</i> Ash cement compositions on the basis of ash and slag wastes of hydropower removal.....	33

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Maksudov D.V.</i> Optimization of ozonator supply voltage frequency	42
<i>Makarov A.N.</i> Calculation of thermal radiation fluxes of arc on the surface of the bath and walls of high-power electric arc steel-melting furnaces. Part I. Heat transfer of electric arc in a metal bath.....	51
<i>Shum Al.A., Vetoshkin A.M.</i> A note on the n -symmetry of a linear rod	63

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Belov V.V.</i> Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 1. Theoretical justification of the method	72
<i>Vinogradova E.A., Molchanov V.P., Shilova O.G.</i> Investigation of the properties and determination of the tetramethylenediethylenetetramine reactivity	83
<i>Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryan S.R.</i> Determination of absorption coefficient in sapropel and reflection coefficient at the water-sapropel boundary using sonar tube	88

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 692.522.2

ВОПРОСЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ СЕЧЕНИЙ ПЕРЕКРЫТИЙ ЭФФЕКТИВНЫХ ФОРМ

Т.Р. Баркая, С.Л. Субботин, Л.С. Чернокожева, В.А. Томашова
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Баркая Т.Р., Субботин С.Л.,
Чернокожева Л.С., Томашова В.А., 2024

Аннотация. Рассмотрено несколько способов создания расчетной модели ребристых перекрытий путем разбиения на конечные элементы в программно-вычислительном комплексе SCAD Office. Выполнены расчеты соответствующих моделей опертого по контуру перекрытия, произведены сопоставления результатов их расчета с аналитическим расчетом. Сделаны выводы о целесообразности применения рассмотренных вариантов моделирования перекрытия на практике.

Ключевые слова: железобетон, кессонные перекрытия, пустотные перекрытия, компьютерное моделирование, программно-вычислительный комплекс, расчетная модель, метод конечных элементов.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-5-12

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительную долю в строительстве занимает монолитное домостроение. На рынке можно увидеть множество опалубочных систем, позволяющих возводить облегченные монолитные перекрытия эффективных форм. Однако все еще актуальными остаются вопросы создания компьютерных моделей таких перекрытий.

Выполним статический расчет нескольких моделей свободно опертого по контуру монолитного перекрытия эффективной формы: кессонного (рис. 1а) и многопустотного (рис. 1б). Перекрытие имеет в плане квадратную форму с размерами 9×9 м и нагружено равномерно распределенной нагрузкой с расчетным значением $7,06 \text{ кН/м}^2$. В качестве результатов расчета рассмотрены перерезывающие силы Q и изгибающие моменты M в нормальных сечениях балок перекрытия.

Компьютерные модели перекрытий реализованы в программно-вычислительном комплексе (ПВК) SCAD Office с использованием стержневых и оболочечных конечных элементов (КЭ). Оценка полученных результатов расчета произведена на основании сравнения с итогами аналитического расчета, выполненного в соответствии с рекомендациями источников [2–4] как для обыкновенной плиты, опертой по контуру.

Среди ряда моделей, рассмотренных в работах [1, 5–7], для исследования выбраны три способа моделирования кессонного перекрытия и один многопустотного. Поперечные сечения балок этих перекрытий с разбиением их на конечные элементы показаны на рис. 2. Стенка во всех моделях моделируется КЭ типа 5 (пространственный стержень), полка в

сечениях, продемонстрированных на рис. 2а, б и г, – КЭ типа 44 (прямоугольная оболочка) и в сечении, приведенном на рис. 2в, – стержневым КЭ типа 5. Разбиение полки с шагом, равным $\frac{1}{4}$ шага ребер монолитных перекрытий, необходимо для более частой передачи усилий между КЭ и более правильной работы полки в ячейке, образованной пересекающимися ребрами.

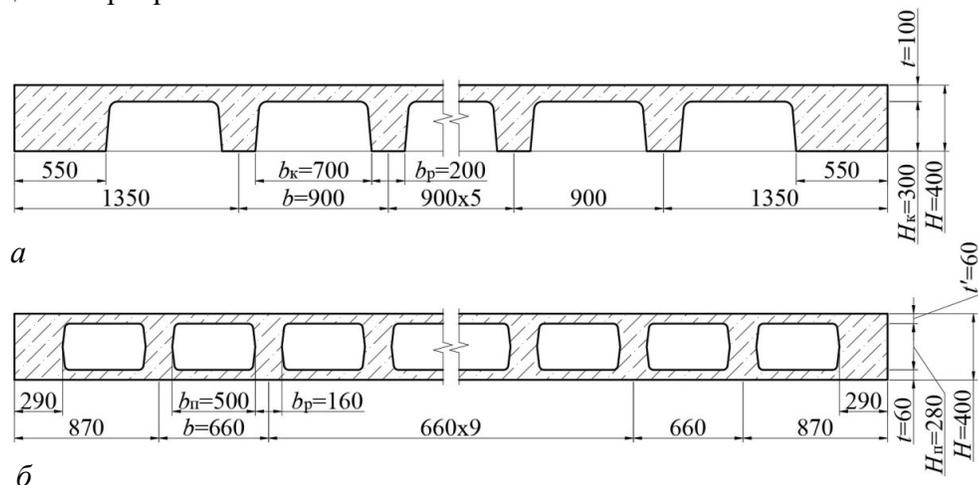


Рис. 1. Поперечное сечение монолитного перекрытия: а – кессонного; б – многопустотного

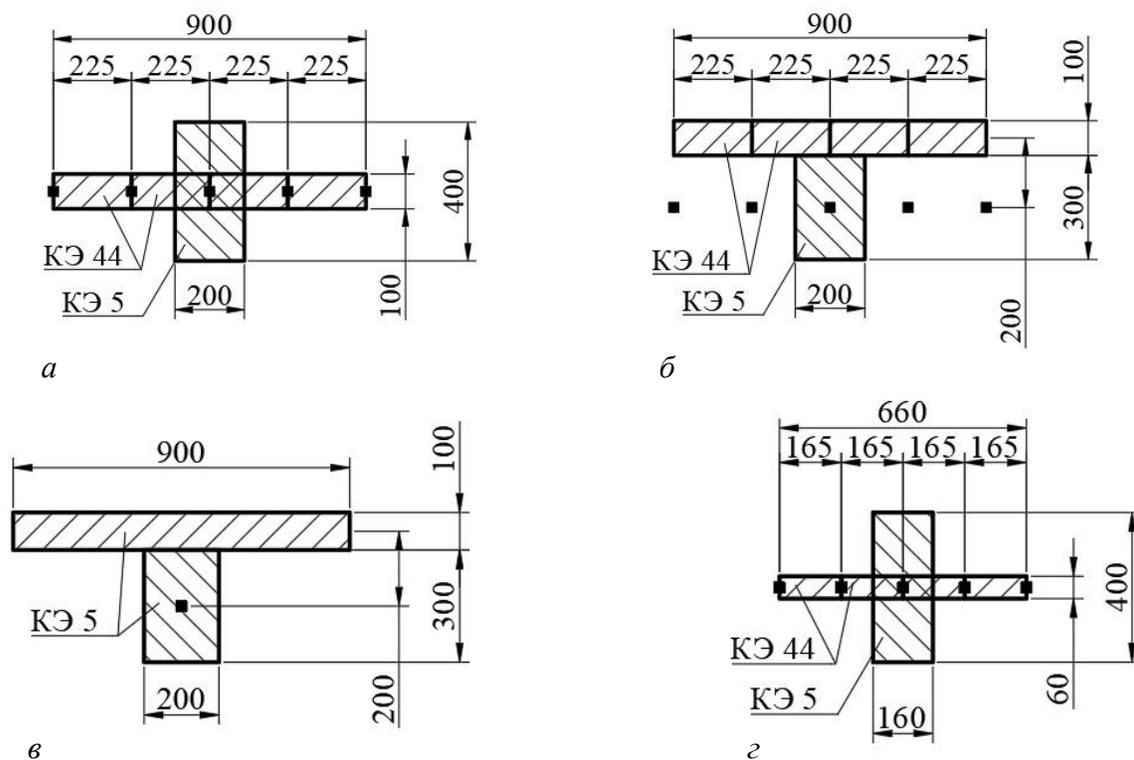


Рис. 2. Схемы поперечных сечений балок в составе перекрытия:
а, б, в – кессонного; г – многопустотного

В целях более корректного отражения жесткостных характеристик перекрытия в конечные элементы полков таврового сечения (Т-сечения) двух моделей (см. рис. 2б, в) введены смещения срединной поверхности оболочечных элементов и жесткие вставки в стержневые конечные элементы соответственно.

Кроме того, следует отметить, что ввиду малых фактических размеров полки в свету между ребрами ($0,7 \times 0,7$ м в кессонном перекрытии и $0,5 \times 0,5$ м в многопустотном) при рассмотрении модели перекрытия с сечениями балок по схеме, показанной на рис. 2а, нет необходимости использовать цилиндрическую жесткость плиты, как это было выполнено в работе [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения *аналитического расчета*, результаты которого будут служить основой для дальнейшего (сравнительного) анализа, перекрытие разбивается в двух направлениях на условные балки пролетами a и b (рис. 3). При равных жесткостях их можно рассматривать как отдельные шарнирно опертые балки, нагруженные равномерно распределенными нагрузками: балку $a_1 - q_{a1}$, балку $a_2 - q_{a2}$ и т. д.; балку $b_1 - q_{b1}$, балку $b_2 - q_{b2}$ и т. д.

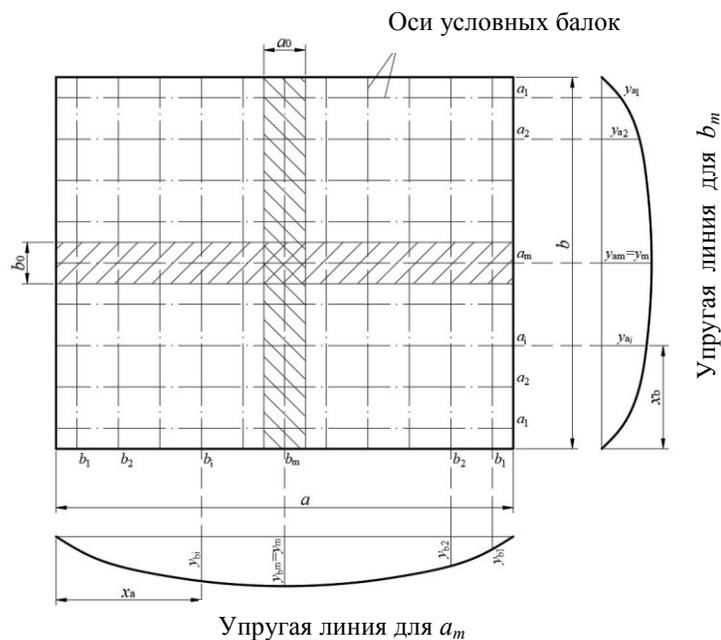


Рис. 3. Схема для аналитического расчета перекрытия

Вышеназванные нагрузки можно найти из выражений:

$$\begin{aligned} q_{ai} &= \frac{y_{ai}}{y_m} b_0 q_a, \\ q_{bi} &= \frac{y_{bi}}{y_m} a_0 q_b, \end{aligned} \quad (1)$$

где y_{ai} , y_{bi} – максимальный прогиб в середине пролета i -й балки с пролетами a и b соответственно; b_0 и a_0 – ширина условной балки пролетами a и b соответственно;

q_a, q_b – условные нагрузки, действующие на средние условные балки a_m и b_m соответственно.

Величины нагрузок q_a и q_b в формуле (1) найдены из двух условий:

$$\begin{cases} q_a = \frac{b^4}{a^4}, \\ q_b = \frac{a^4}{b^4}, \\ q = q_a + q_b, \end{cases} \quad (2)$$

где q – полная нагрузка на перекрытие.

Перекрытие имеет одинаковую геометрию в двух направлениях. Поскольку $a = b = 9$ м, то из условий (2) следует, что нагрузки q_a и q_b тоже равны. И тогда внутренние усилия в балках b_i равны усилиям в соответствующих балках a_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кессонное перекрытие. Модель 1, реализованная по схеме, приведенной на рис. 2а, не повторяет геометрию кессонного перекрытия (крестовое сечение). Существенное преимущество такой модели заключается в том, что полка располагается в средней по высоте части, то есть в уровне нейтральной оси. В моделях без смещения полки последняя преимущественно играет роль распределяющего нагрузку элемента, принимая на себя незначительную долю изгибающего момента в Т-сечении.

Результаты расчета показали, что в модели без смещения полки (см. рис. 2а) величины изгибающих моментов в стенке, то есть полученные в стержневых КЭ модели, отличаются от аналитического расчета не более чем на 10,0 %. Полученное на основании этих изгибающих моментов требуемое продольное армирование в Т-сечении также отличается не более чем на 10 %. При предварительном подборе армирования (до учета нелинейной работы конструкции) такое отклонение можно допустить.

Перерезывающие силы, полученные в стержневых КЭ модели 1, имеют значительное отклонение от результатов аналитического расчета (более 15,0 %) как в меньшую, так и в большую сторону. Однако эти отклонения велики в пролете и имеют заниженный характер, что незначительно влияет на анализ поперечного армирования, так как фактические величины перерезывающей силы в пролете малы. Но стоит иметь в виду недопустимое завышение перерезывающих сил в опорной части (до 45,0 %), которое вызвано, предположительно, особенностями реализации опорного контура перекрытия и отличного от рядового шага ребер перекрытия в поперечном направлении.

В модели 2, реализованной по схеме, показанной на рис. 2б, нельзя принять внутренние усилия в стержневых КЭ стенки за усилия в Т-сечении, поскольку введение эксцентриситета между стенкой и полкой приводит к распределению изгибающего момента с появлением продольных усилий: сжимающего в полке и растягивающего в стенке. То же самое справедливо и для модели 3, построенной в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2в.

В моделях со смещением полок величина Q в Т-сечении найдена как сумма перерезывающих сил в стенке и полке. Величина перерезывающей силы в полке модели 2 получена умножением перерезывающего усилия в среднем узле полки на ее ширину. Величина M для моделей 2 и 3 определена как сумма моментов, возникающих в полке и стенке, и произведения продольной силы в стенке на расстояние между центрами тяжести полки и стенки. При этом изгибающий момент в полке модели 2 получен как произведение изгибающего момента для оболочек в среднем узле полки на ее ширину.

Изгибающие моменты в балках модели 2 отличаются от аналитического расчета не более чем на 9,3 %, причем отрицательное отклонение не превышает 5,0 %. Более точной показала себя модель 3, в ней отклонения изгибающих моментов в середине пролета балок не превышают 5,0 % (такую точность считаем достаточной). При этом в обеих моделях можно отметить увеличение отклонений величины M от аналитического расчета при приближении к приопорным зонам: в модели 2 – до +9,4 %, в модели 3 – до +28,2 %. Обе модели со смещением полки показывают значительные отклонения в величинах перерезывающих сил. Так, в приопорной зоне в модели 2 они достигают 58 %, а в модели 3 – 65,4 %.

Получение полных внутренних усилий на основании данных расчета КЭ полок и стенок Т-сечения достаточно трудоемко. Поэтому отметим, что при определении изгибающих моментов в сечении балки без учета доли момента, приходящегося на полку, но с принятием во внимание продольного усилия в стенке, умноженного на эксцентриситет полки относительно стенки, модели 2 и 3 дают приемлемые результаты: в середине пролета отклонения составляют от –4,0 % до +6,2 %. Только в первой от опорного контура балке a_1 изгибающий момент снижен на 13,6 %.

Подбор армирования в моделях 2 и 3 произведен для стержневых КЭ стенки с помощью постпроцессора SCAD Office. Полученные требуемые величины площадей нижнего продольного армирования для обеих моделей практически не отличаются от величин, полученных в аналитическом расчете. Для всех балок максимальное армирование в середине пролета определено с «запасом» не более 3,3 %.

Многопустотное перекрытие. При реализации расчетных схем многопустотного перекрытия, аналогичных схемам, показанным на рис. 2б и в, возникают дополнительные сложности с обработкой результатов статического расчета. Так, для получения полного момента в балке двутаврового сечения (2Т-сечения) необходимо учесть изгибающие моменты, возникающие в стенке и двух полках, а также продольные усилия (сжимающее в верхней полке и растягивающее в нижней). В связи с этим для многопустотного перекрытия рассмотрена только одна модель с крестообразным сечением без вмещения полки (см. рис. 2з) и внутренние усилия в сечении балок определены так же, как и для модели 1 кессонного перекрытия.

Согласно результатам расчета в зонах, отдаленных от опорного контура, изгибающие моменты в балках получены с отклонениями до 10,0 %. В приопорной зоне балок a_1 , a_2 и a_3 величина M превышает значения из аналитического расчета более чем на 10,0 % и достигает 30,2 %. В пролете перерезывающие силы превышены не более чем на 10,0 %, а на опоре их величины значительно превосходят контрольные (до 74,7 %). Требуемое продольное армирование балок многопустотного перекрытия на основании полученных в сечении изгибающих моментов M отличается от результатов аналитического расчета тоже не более чем на 10,0 %.

Величины изгибающих моментов, действующих в стержневых КЭ схемы в пролетной части, отличаются от контрольных более чем на –10,0 %, при этом в середине пролета отклонения достигают –16,5 %. Такие величины M не следует использовать для подпора продольного армирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее рационально при выполнении предварительно статического расчета и первичного подбора продольного армирования использовать схемы без смещения полков (см. рис. 2а, з). Это обусловлено более простой обработкой результатов расчета компьютерной модели и возможностью применять для подбора армирования внутренние усилия, полученные непосредственно в стержневых КЭ стенки. При этом необходимо более подробно изучить зависимость распределения усилий между КЭ от соотношения жесткостей стенки и полки.

На основании рассмотренных примеров можно говорить о том, что первичный подбор продольного армирования при использовании моделей с поперечным сечением без смещения полки (крестовым сечением) допускается выполнять на основании внутренних усилий, действующих в КЭ стенки.

Выполнение статического расчета на основании моделей с Т-сечением оказывается более трудоемким, но дает более точные величины изгибающих моментов в сечении балки. Для упрощения при первичном подборе продольного армирования можно использовать в качестве изгибающих моментов в Т-сечении изгибающий момент в КЭ стенки, увеличенный на пару сил, которую можно определить как произведение продольной силы в стенке на расстояние между центрами тяжести стенки и полки.

Выполнение расчетов для нахождения перерезывающих сил в сечениях балок в составе перекрытий эффективных сечений требует более глубокого изучения. Многие рассмотренные расчетные модели перекрытия показали хорошие результаты при определении перерезывающих сил в пролете. Значительные отклонения выявлены в зонах с малыми значениями перерезывающих сил и в зонах, приближенных к опорному контуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобородов Е.В., Созонов П.С. Анализ способов моделирования железобетонных монолитных перекрытий на примере кессонных // *Тенденции развития науки и образования*. 2023. № 95. С. 127–130.
2. Глотов Д.А., Лоскутов И.С., Кантур О.В. Монолитные пустотные перекрытия в строительстве зданий // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2012. № 3. С. 66–71.
3. Грановский А.В., Чупанов М.Р. Экспериментальные исследования несущей способности плит перекрытий кессонного типа // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 5. С. 43–48.
4. Залигер Р. Железобетон. Его расчет и проектирование / пер. с нем. Л.В. Рейнберга, Н.Н. Чечулина. М.; Л.: Государственное научно-техническое издательство, 1931. 671 с.
5. Крохин Д.А., Медведев Н.Е. Расчет и проектирование кессонных перекрытий в ПК ЛИРА-САПР. *Материалы 61-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ* / отв. ред. П.И. Егоров. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2021. С. 284–288.
6. Мозголов М.В., Козлова Е.В. Верификация моделей SCAD железобетонного кессонного перекрытия на основе аналитического метода расчета, учитывающего пролеты и жесткость // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2023. № 2. С. 29–40.
7. Мозголов М.В., Козлова Е.В. К вопросу создания верификационной модели для расчета кессонного железобетонного перекрытия в вычислительном комплексе SCAD // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. Т. 32. № 1. С. 128–140.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru

ЧЕРНОКОЖЕВА Любовь Сергеевна – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Luba-99-Tcher-8790@mail.ru

ТОМАШОВА Виктория Андреевна – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tomashova3@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Чернокожева Л.С., Томашова В.А. Вопросы компьютерного моделирования расчетных сечений перекрытий эффективных форм // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 5–12.

**COMPUTER MODELING ISSUES OF DESIGN SECTIONS
OF EFFECTIVE FORMS OF FLOORS**

T.R. Barkaya, S.L. Subbotin, L.S. Chernokozheva, V.A. Tomashova
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Several ways of creating a computational model of ribbed overlaps by splitting into finite elements in the SCAD Office software and computing complex are considered. Calculations of the corresponding models of the overlap supported along the contour have been performed, and comparisons of the results of their calculation with the analytical calculation have been made. Conclusions are drawn about the expediency of using the considered overlap modeling options in practice.

Keywords: reinforced concrete, caisson floors, hollow-core floors, computer modeling, software and computing complex, calculation model, finite element method.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

CHERNOKOZHEVA Lyubov Sergeevna – Master's Degree Student of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Luba-99-Tcher-8790@mail.ru

TOMASHOVA Viktoria Andreevna – Master’s Degree Student of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tomashova3@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Subbotin S.L., Chernokozheva L.S., Tomashova V.A. Computer modeling issues of design sections of effective forms of floors // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 5–12.

УДК 004.415

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Т.Р. Баркая, С.Л. Субботин, В.А. Томашова, Л.С. Чернокожева
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Баркая Т.Р., Субботин С.Л.,
Томашова В.А., Чернокожева Л.С., 2024

Аннотация. Рассмотрена возможность реализации автоматизированного построения эпюры материалов для изгибаемых железобетонных линейных элементов. Предложена методика, позволяющая формировать графики действующих и предельных изгибающих моментов, распределенных по длине статически неопределимых балок. Приведены результаты сравнительного анализа со значениями, полученными с помощью программно-вычислительного комплекса SCAD Office.

Ключевые слова: эпюра, изгибающий момент, автоматизация, железобетонные конструкции, эпюра арматуры, эпюра материалов.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-12-18

ВВЕДЕНИЕ

Экономия материалов при проектировании строительных конструкций за счет повышения точности расчетов всегда являлась одной из основных инженерных задач. Важно реализовать это без потери скорости проектирования. Все чаще здесь отдают предпочтение автоматизации путем применения программных средств.

Оптимально подобранным армированием можно считать такое, при котором несущая способность сечения задействована полностью. Это можно выразить через коэффициент использования – отношение предельного значения величины момента к значению действующего. По длине железобетонного элемента изгибающий момент различен, поэтому назначение единого армирования по участку с его максимальным значением приведет к перерасходу арматуры на остальных участках. Перед проектировщиком ставится задача назначения армирования с учетом экономии арматуры и целесообразности в свете технологичности и трудоемкости.

Эпюра материалов (в литературе встречается также термин «эпюра арматуры» [1, 2]) отражает обеспеченность несущей способности в расчете по нормальным или наклонным сечениям. Другими словами, это графическое представление коэффициента использования по моменту. Но, кроме того, по таким графикам также можно определить точки теоретического обрыва стержней, которые, в свою очередь, обуславливают начало участка анкеровки арматурного стержня.

Анализ несущей способности сечений железобетонных изгибаемых элементов показывает, что эпюра материалов позволяет повысить качество принятых решений, касающихся армирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При расчете и выводе эпюры материалов в таком сателлите SCAD Office, как «Арбат» [3], были обнаружены некоторые ограничения для применения при решении указанных выше задач.

Во-первых, не реализована возможность установки арматуры в стенку тавра, а при автоматической установке в полку не выполняется требование по величине защитного слоя, если ее высота невелика (рис. 1).

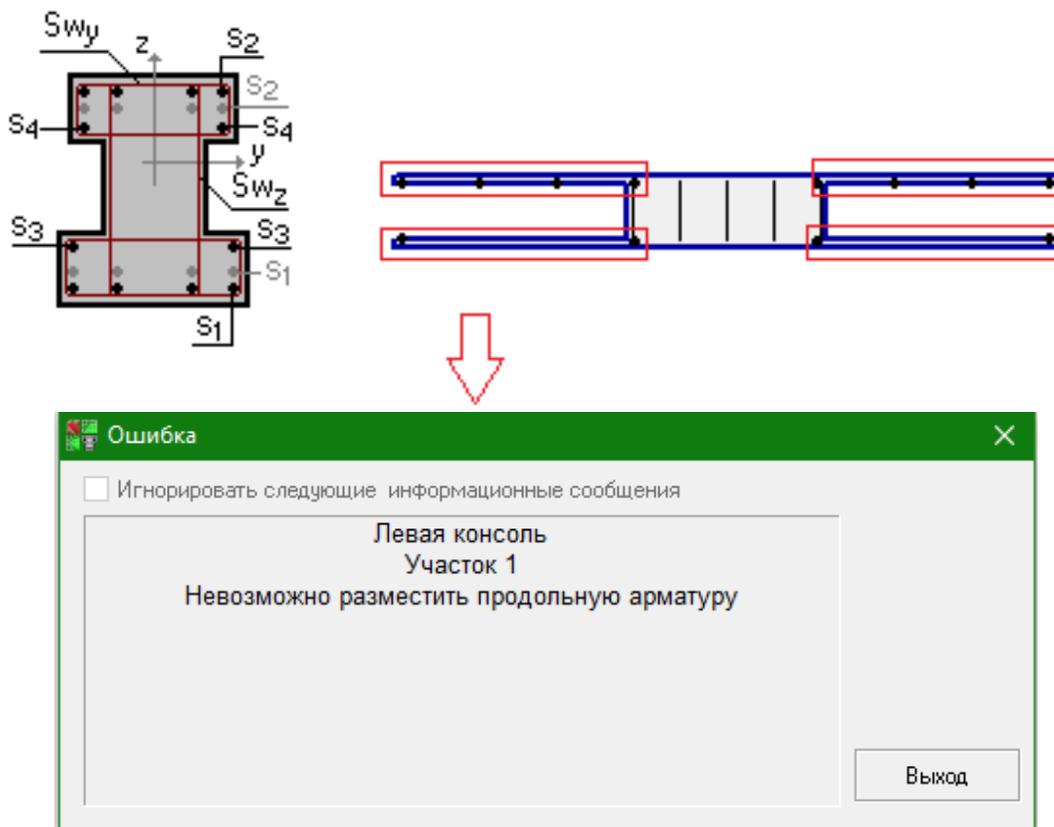


Рис. 1. Сообщение об ошибке размещения арматуры при расчете в программно-вычислительном комплексе SCAD Office

Во-вторых, имеется несоответствие эпюры материалов и результатов расчета (коэффициента использования по моменту). Согласно руководству SCAD Office [3], эпюра

материалов строится исходя из того, что коэффициент надежности по нагрузке равен 1,1, а коэффициент длительной части – 1. Предположительно, на участках, где определяющим критерием становится ширина раскрытия трещин, на эпюре материалов в качестве несущей способности отображается момент от нормативной, а не расчетной нагрузки (рис. 2).

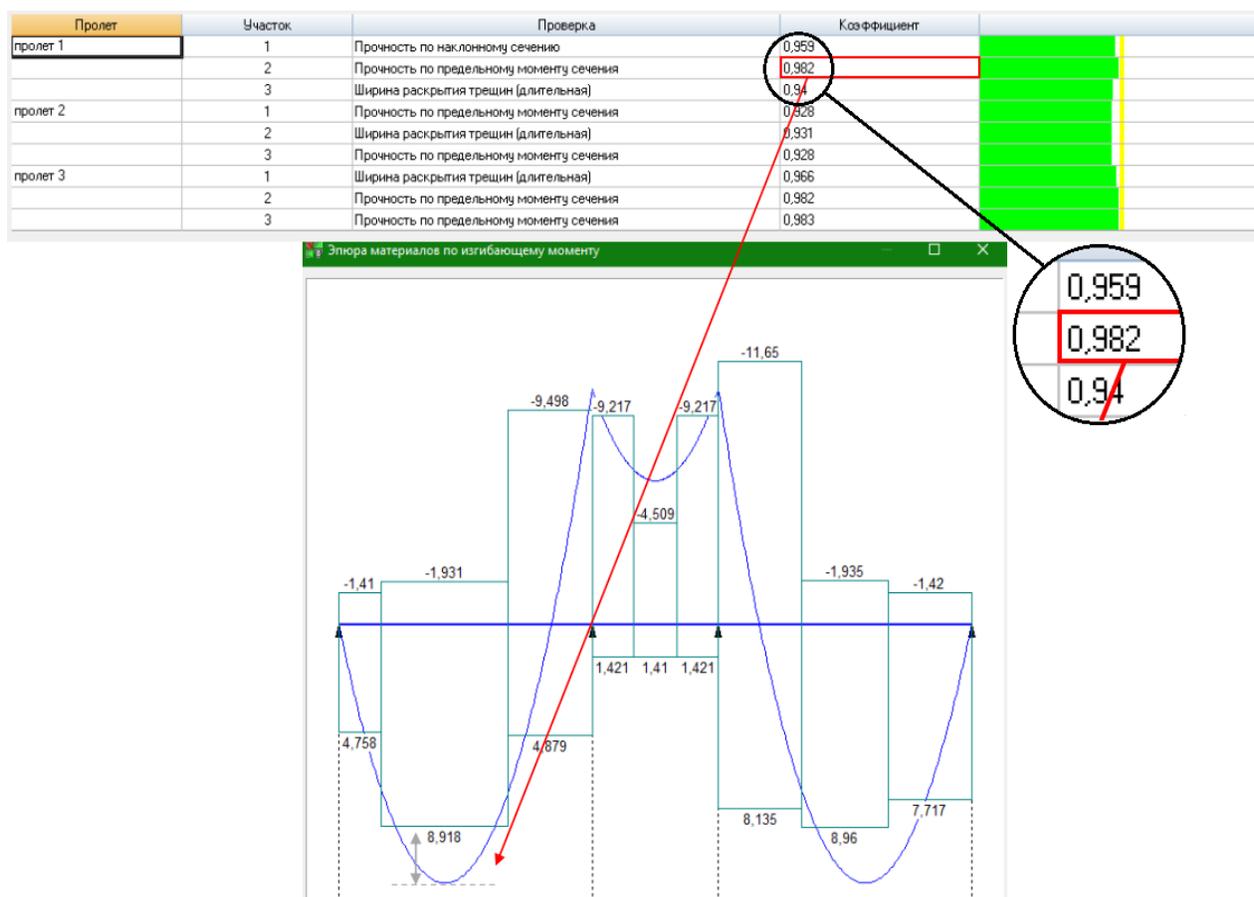


Рис. 2. Ошибка в построении эпюры материалов, полученной в сателлите SCAD Office («Арбате»)

Проблемы расчета, описанные выше, подтверждают необходимость разработки программного средства, позволяющего получить корректную эпюру материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На языке программирования Python с использованием библиотек Matplotlib и Tkinter, модуля Ruyplot с применением монолитной архитектуры [4, 5] реализован алгоритм статического расчета и определения соответствующей несущей для трех схем неразрезных балок (двух-, трех- и семипролетной) с крайними консольными пролетами.

Сформированные программой графики, соответствующие эпюре вычисленных изгибающих моментов, изображены на рис. 3. Для определения графика функции для каждого пролета был применен метод сил.

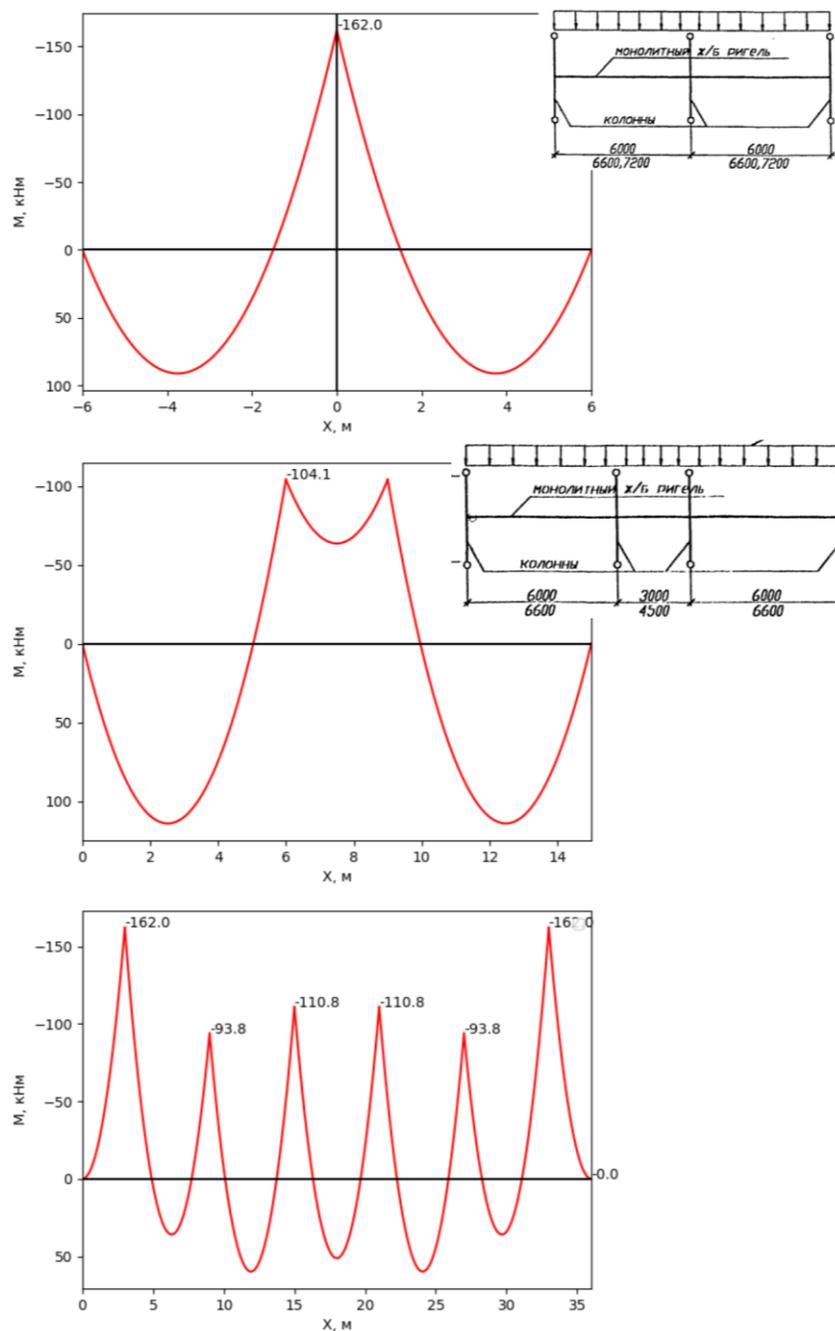


Рис. 3. Эпюры действующих изгибающих моментов по результатам расчета тестовой модели

Для отображения значения моментов, которые могут быть восприняты балкой в расчетном сечении, использовалась стандартная методика расчета сечений изгибаемых железобетонных элементов [6].

В ходе проверки сходимость с контрольными примерами, приведенными в пособии к СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры», а именно примерами 6 и 9 для прямоугольного и таврового

сечения соответственно [7], погрешность составила менее 5 % из-за отличия табличного значения расчетного сопротивления арматуры от величины, содержащейся в действующих нормах [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При зеркальном наложении эпюр материалов, полученных двумя способами (с помощью программной реализации предлагаемого алгоритма и на основе сателлита программно-вычислительного комплекса SCAD Office «Арбат»), можно отметить хорошее соответствие численных результатов (рис. 4).

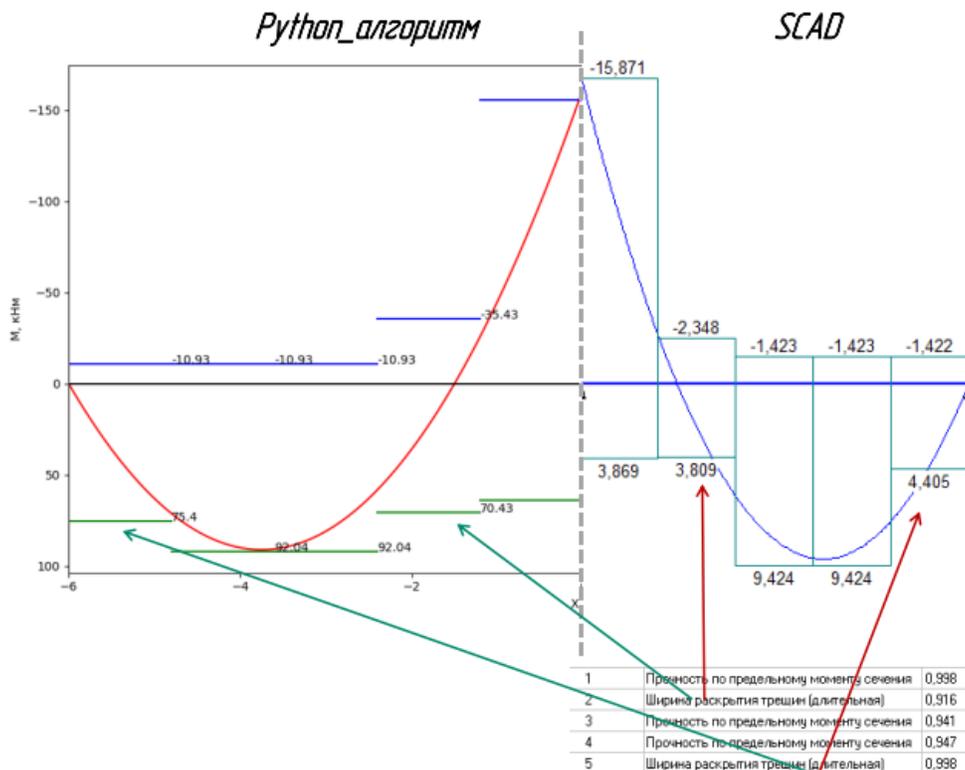


Рис. 4. Эпюры материалов (сравнение)

Соответствие выражено совпадением коэффициентов использования, полученных с помощью лицензионного программного продукта и графика, построенного при помощи первого способа. Представляется перспективным включение подобных модулей в стандартный набор сателлитов программ различных и широко используемых программно-вычислительных комплексов, таких как SCAD Office и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 767 с.
2. Красный Н.С., Дзюба В.А. Расчет эпюры материалов с учетом конструктивной арматуры в сжатой зоне. *Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: Материалы X Международной научно-практической конференции молодых ученых: в 2 ч.*

- /редкол.: О.Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. Ч. 1. С. 237–239.
3. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А., Фиалко С.Ю. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. М.: СКАД СОФТ, 2015. 848 с.
4. Акишин Б.А. Использование возможностей среды программирования Python при изучении математических дисциплин в техническом вузе // *Электронные библиотеки*. 2020. Т. 23. № 1-2. С. 6–13.
5. Бастрон А.А. Решение задач на оптимальное соотношение на языке Python 3.X с использованием математического пакета Scipy. *Наука, инновации, образование: актуальные вопросы XXI века: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Пенза, 10 декабря 2022 года*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 15–21.
6. СП 63.13330.2018. *Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения* / ред. Т.А. Мухамедиев [и др.]. М.: Минстрой России, 2018. 138 с.
7. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). М.: ОАО «ЦНИИПромзданий», 2005. 304 с. URL: http://www.inexpro.su/dat/codes_doc_405.pdf (дата обращения: 23.06.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- БАРКАЯ Темур Рауфович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru
- СУББОТИН Сергей Львович* – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru
- ТОМАШОВА Виктория Андреевна* – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tomashova3@gmail.com
- ЧЕРНОКОЖЕВА Любовь Сергеевна* – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Luba-99-Tcher-8790@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

- Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Томашова В.А., Чернокожева Л.С. Анализ несущей способности сечений изгибаемых железобетонных элементов с применением программных средств // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 12–18.

**ANALYSIS OF LOAD CAPACITY OF SECTIONS OF BENDING REINFORCED
CONCRETE ELEMENTS USING SOFTWARE TOOLS**

*T.R. Barkaya, S.L. Subbotin,
V.A. Tomashova, L.S. Chernokozheva
Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The possibility of implementing an automated plotting of materials for bent reinforced concrete linear elements is considered. A technique is proposed that allows the formation of graphs of acting and limiting bending moments distributed along the length of statically indeterminate beams. The results of a comparative analysis with the values obtained using the SCAD Office software and computing complex are presented.

Keywords: diagram, bending moment, automation, reinforced concrete structures, reinforcement diagram, materials diagram.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BAR KAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

TOMASHOVA Viktoria Andreevna – Master’s Degree Student of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tomashova3@gmail.com

CHERNOKOZHEVA Lyubov Sergeevna – Master’s Degree Student of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Luba-99-Tcher-8790@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Subbotin S.L., Tomashova V.A., Chernokozheva L.S. Analysis of load capacity of sections of bending reinforced concrete elements using software tools // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 12–18.

УДК 691.32

**ЗАВИСИМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КАРБОНАТНОГО БЕТОНА
ОТ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ*****В.В. Белов, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Куляев П.В.,
Баркая Т.Р., 2024

Аннотация. Отмечено, что динамические характеристики (ударная вязкость и динамическая прочность) не только связаны с прочностью материала, но и зависят от уровня деформации и скорости деформирования в момент нагружения материала. Рассмотрено использование комплексной добавки, включающей известняковый микронаполнитель и суперпластификатор, которые повышают уровень энергии, поглощаемой при деформировании и разрушении образца. Скорость этого поглощения оценена через сравнение ударной вязкости и динамической прочности для трех составов образцов: двух с известняковым микронаполнителем и одного базового (без включения в состав известняка). Выявлено, что известняковый полуинертный и тонкодисперсный наполнитель повышает ударную вязкость и динамическую прочность, что делает мелкозернистый известняковый бетон материалом, хорошо воспринимающим ударные нагрузки. По результатам исследования также сделан вывод, что ударная вязкость и свойства поглощения энергии трещинообразования и разрушения карбонатных бетонов чувствительны к скорости деформации и зависят от процентного содержания минерального карбонатного компонента в матрице бетона. Показано, что динамическая прочность карбонатных бетонов при сжатии повышается с ростом скорости деформации, а количество поглощенной энергии увеличивается со средней скоростью изменения кинетической энергии нагружения.

Ключевые слова: динамические нагрузки, скорость деформации, динамическая прочность, ударная вязкость.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-19-25***ВВЕДЕНИЕ***

При динамических испытаниях и анализе ударной вязкости влияние скорости нагружения на процесс деформирования и разрушения бетона становится важным параметром, который необходимо учитывать для оценки динамических характеристик. Экспериментальные исследования, посвященные изучению механизма поглощения энергии в карбонатном бетоне с учетом скорости нагружения, весьма немногочисленны [1]. При этом разрушение бетонных образцов рассматривается по уровню микротрещинообразования в упругой области [2, 3]. Воздействие скорости деформации на динамическую прочность и вязкость бетона может быть проанализировано с двух точек зрения: при построении картины напряженного состояния во взаимосвязи с процессом распространения трещин и в свете анализа перераспределения (поглощения и рассеивания) внутренней энергии [4]. При оценке напряженного состояния эффект упрочнения бетона с повышением скорости деформирования можно считать упругопластической реакцией

матрицы композита при изменении одноосного напряженно-деформированного состояния [5]. Из-за краткосрочности приложения нагрузки боковая деформация образца лимитирована инерционным действием материалов. Ограничивающий эффект возрастает с увеличением скорости воздействия, при этом повышается динамическая прочность бетона. В соответствии с характером распространения микротрещин и распределения энергии причинами микроразрывов внутренней структуры композита являются все виды внутренних микродефектов и дислокаций бетона [6, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Тверском государственном техническом университете было проведено исследование зависимости ударной вязкости и динамической прочности карбонатного бетона от скорости деформирования [8]. Тонкодисперсный карбонатный наполнитель получали путем помола продукта дробления известняка. В качестве заполнителя были взяты зерна известняка размером от 5 до 0,05 мм. Девять бетонных балочек-призм с размерами $10 \times 10 \times 40$ см испытали на поперечный удар. У трех призм был базовый состав бетонной смеси без известнякового наполнителя. Шесть призм содержали известняковый наполнитель. Для оценки динамических свойств карбонатного бетона при изготовлении опытных образцов применяли несколько составов смеси (табл. 1).

Таблица 1

Опытные составы, кг/м³ смеси

Компонент смеси	Базовый состав	Номер состава карбонатного бетона	
		1	2
Цемент	650	480	340
Заполнитель	1490	1530	1530
Вода	260	290	330
Водоцементное отношение	0,4	0,42	0,5
Известняковый наполнитель	–	200	340
Суперпластификатор СП-1	–	5	2,52

Динамическая прочность определяется как максимальное (пиковое) напряжение при испытании на поперечное ударное воздействие. Она служит одним из основных показателей, отражающих динамические свойства бетона; находят ее по формуле

$$R_d = R \cdot K_d, \quad (1)$$

где R – прочность бетона при сжатии, МПа; K_d – коэффициент динамичности.

Коэффициент динамичности рассчитывался по стандартной методике с учетом размеров и массы ударного наконечника и упругих характеристик материала опытных образцов.

Ударная вязкость a_k , являющаяся мерой сопротивления материала балочек удару, определяется как отношение работы, затрачиваемой на разрушение образца, к площади поперечного сечения образца:

$$a_k = A / A_{обр}, \quad (2)$$

где A – работа, затрачиваемая на разрушение призмы-балочки, кН · м; $A_{обр}$ – площадь поперечного сечения образца.

Работа определялась как произведение массы груза на разницу между высотой подъема наконечника и высотой его отскока в миллиметрах (аналог подъема груза маятникового копра после разрушения образца). Ударную вязкость находили в зависимости от времени приложения нагрузки косвенно (как функцию массы наконечника и скорости его воздействия на балку).

Образцы испытывались на специальном устройстве рамного типа, общий вид которого изображен на рис. 1. Данное устройство имитирует ударный копер стандартных методик, используемый для определения ударной вязкости, но с приложением нагрузки не в горизонтальной плоскости, а в вертикальной. Высота подъема наконечника составляет 10–50 см, масса груза в наконечнике варьируется от 5 до 25 кг.



Рис. 1. Общий вид ударной установки с положением образца-призмы для испытания на поперечный удар

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенные результаты испытаний серий опытных образцов-балочек на динамическое нагружение с указанием свойств бетона приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Коэффициенты динамичности и динамическая прочность

Показатель	Состав бетона		
	Базовый	Опытный № 1	Опытный № 2
Коэффициент динамичности	1,26	1,28	1,31
Динамическая прочность, МПа	42,34	43,52	33,67

Таблица 3

Ударная вязкость, $\text{кН} \cdot \text{м}/\text{см}^2$

Время приложения нагрузки, м/с	Состав бетона		
	Базовый	Опытный № 1	Опытный № 2
15	0,11	0,13	0,125
20	0,21	0,26	0,24
30	0,314	0,52	0,48

Скол опытного образца после разрушения представлен на рис. 2.



Рис. 2. Образец после разрушения

Зависимость ударной вязкости от времени приложения нагрузки приведена на рис. 3.

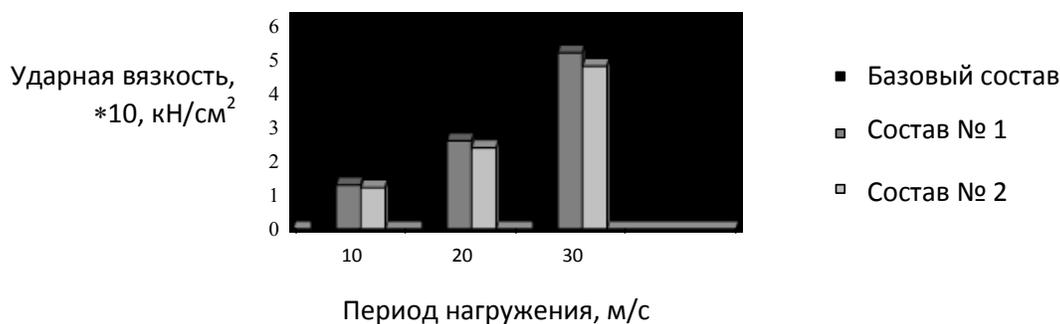


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости, $\text{кН} \cdot \text{м}/\text{см}^2$, от времени приложения нагрузки

Чем больше доля карбонатного наполнителя в бетоне, тем выше ударная вязкость и динамическая прочность бетона. Значения ударной вязкости и прочности для образцов-балочек, включающих известняковый наполнитель, больше, чем для образцов без него. Комплексная добавка из наполнителя и суперпластификатора способствует формированию пластических зон в матрице композита, тем самым повышая свойства поглощения (демпфирования) ударной нагрузки.

Значения ударной вязкости как меры материала воспринимать удар указывают на лучшую деформационную способность образцов на карбонатной основе по сравнению с образцами базового состава. Известняковый микронаполнитель, очевидно, повышает скорость поглощения общей (кинетической и потенциальной) энергии удара бетона образцов-призм, тем самым увеличивая долговечность известнякового мелкозернистого бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорость приложения ударной нагрузки значительно влияет на динамические характеристики бетонных образцов. С повышением скорости удара значения динамических характеристик для образцов с содержанием добавки карбонатного микронаполнителя и суперпластификатора растут пропорционально этому проценту до определенного значения, после чего начинают плавно снижаться. Это говорит о существовании верхнего предела содержания карбонатного компонента в составе бетона, соответствующего оптимальному проценту (порядка 30 %); для этого предела значения мер динамического сопротивления удару (ударной вязкости и динамической прочности) достигают в совокупности своего максимума. Оба вида бетона (базовый и карбонатный) являются материалами, чувствительными к скорости нагружения и деформации. Динамические свойства, включая динамическую прочность, предельную динамическую деформацию и ударную вязкость, изменяются со скоростью деформации неоднозначно. При ударной нагрузке общее энергопоглощение бетона возрастает с увеличением скорости изменения энергии удара и содержанием демпфирующей добавки из микронаполнителя и суперпластификатора. По сравнению с обычным бетоном карбонатный композит с добавкой из известнякового наполнителя и суперпластификатора в оптимальных количествах (до 30 %) обладает более высокими показателями динамической прочности, деформации, ударной вязкости и энергии, и это преимущество становится еще более очевидным при возрастании скорости деформации. Следовательно, карбонатный мелкозернистый бетон имеет более широкие перспективы применения в инженерных системах, работающих в условиях обычных и интенсивных ударных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alam S.Y., Loukili A. The transition from energy dissipation processes to dislocation disturbances during concrete destruction. URL: https://www.researchgate.net/publication/303514585_Transition_from_energy_dissipative_processes_to_displacement_discontinuities_during_concrete_failure (дата обращения: 28.07.2024).
2. Moser B., Pfeifer S. Microstructure and durability of ultra-high performance concrete. *Proceedings of the Second International Symposium on Heavy-duty Concrete*. 2008, pp. 417–425. URL: <https://books.google.ru/books?id=OMsdSJ-LUBQC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 28.07.2024).
3. Desnerk P., Schutter De G., Tervey L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers. URL: https://www.researchgate.net/publication/259383708_Stress-strain_behaviour_of_self-compacting_concretes_containing_limestone_fillers (дата обращения: 28.07.2024).
4. Dear J. Dynamic and impact response of materials and structures // *The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*. 2011. № 17 (2), pp. 37–38.

5. Luo X., Xu Y., Bai E., Li W. Mechanical properties of ceramics–cement based porous material under impact loading. URL: https://www.researchgate.net/publication/277485311_Mechanical_properties_of_ceramics-cement_based_porous_material_under_impact_loading (дата обращения: 28.07.2024).
6. Alshaarba I.A.S., Mouwainea E.M., Said A.M.I. Numerical analysis of reinforced concrete beams subjected to impact loads // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023. № 32 (1). URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jmbm-2022-0232/html> (дата обращения: 28.07.2024).
7. Ragueneau F., Gatuingt F. Inelastic behavior modeling of concrete in low and high strain rate dynamics. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002071792300069> (дата обращения: 28.07.2024).
8. Liu Z., Luo Y., Bai H., Zhang Q., Fu Q. A significant increase in the impact strength and heat resistance of poly (L-lactide) / thermoplastic polyurethane mixtures due to the creation of stereocomplex crystallites in the matrix. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1021/acssuschemeng.5b00816> (дата обращения: 28.07.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

БАРКАЯ Темура Рауфович – кандидат технических наук, зав. кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р. Зависимость динамической прочности карбонатного бетона от скорости деформирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 19–25.

DEPENDENCE OF THE IMPACT STRENGTH OF CARBONATE CONCRETE ON THE STRAIN RATE

V.V. Belov, P.V. Kulyaev, T.R. Barkaya
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that the dynamic characteristics (toughness and dynamic strength) are related not only to the strength of the material, but also depend on the level of deformation and the rate of deformation at the time of loading of the material. The use of a complex additive, including a limestone microfiller and a superplasticizer, which increase the level of energy absorbed during deformation and destruction of the sample, is considered. The rate of this absorption was estimated by comparing the impact strength and dynamic strength for three sample compositions: two with limestone microfillers and one base (without inclusion in the

composition of limestone). It has been revealed that limestone semi-inert and finely dispersed filler increases the impact strength and dynamic strength, which makes fine-grained limestone concrete a material that well accepts shock loads. According to the results of the study, it was also concluded that the impact strength and energy absorption properties of cracking and destruction of carbonate concretes are sensitive to the rate of deformation and depend on the percentage of the mineral carbonate component in the concrete matrix. It is shown that the dynamic strength of carbonate concretes under compression increases with an increase in the rate of deformation, and the amount of absorbed energy increases with the average rate of change in the kinetic energy of loading.

Keywords: dynamic loads, strain rate, dynamic strength, impact toughness.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

KULYAEV Pavel Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

BARAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Kulyaev P.V., Barkaya T.R. Dependence of the impact strength of carbonate concrete on the strain rate // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 19–25.

УДК 691.32

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНАТНОГО БЕТОНА В УСЛОВИЯХ СЛАБОИНТЕНСИВНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ

П.В. Куляев, Ю.В. Сизов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Куляев П.В., Сизов Ю.В., 2024

Аннотация. Изучены динамические и статические свойства карбонатного бетона на основе комплексной добавки из тонкодисперсного известнякового порошка и суперпластификатора с использованием слабоинтенсивного ударного сжатия образцов кубов в осевом направлении. Отмечено, что разработка составов ударопрочного бетона служит основой для освоения и применения местных минерально-сырьевых ресурсов. Указано, что соблюдение принципа использования местных материалов при изготовлении

бетона на основе известнякового тонкодисперсного порошка, который отвечает требованиям экономичного проектирования объектов, подвергающихся ударным воздействиям, может значительно сократить сроки и стоимость строительства и повысить долговечность. Сделан вывод, что при содержании известнякового порошка до 25 % динамические характеристики плавно переходят свои пиковые значения. Показано, что с увеличением содержания известнякового порошка в пределах данного объема коэффициент динамического упрочнения бетона сначала повышался, затем снижался и достиг своего максимального значения при содержании известнякового порошка в количестве 22 %.

Ключевые слова: скорость деформации, динамический модуль упругости, коэффициент, динамическое упрочнение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-25-32

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении длительного времени исследователи изучали механические свойства карбонатных бетонов, такие как коррозионная стойкость, долговечность, механические свойства и другие, и был достигнут определенный прогресс [1]. Проведенные работы показали, что из-за относительно низкой прочности, хрупкости, пористости с микроконцентраторами напряжений на границе *заполнитель – наполнитель – матрица* и высокой проницаемости композита, имеющего микродефекты и микротрещины в структуре, бетоны основного состава более чувствительны к динамическому воздействию [2]. Обычный мелкозернистый бетон обладал относительно низкой прочностью на сжатие (порядка 30–40 МПа) [1], что не позволяет выполнить требования, предъявляемые к инженерному строительству динамических сооружений [3]. Поэтому текущие исследования посвящены способам улучшения эксплуатационных характеристик карбонатных бетонов, включая их динамические свойства. В ряде работ показано, что механические свойства бетона тесно связаны с его составом и структурой [4–7]. Некоторые ученые сосредоточились на способах повышения прочности бетона путем оптимизации соотношения компонентов смеси [8], в то время как другие пытаются улучшить характеристики композитов, добавляя в их структуру различные волокна. Например, Сюй и другие [9] включали стеклянные волокна в матрицу бетона и разработали метод анализа развития внутренних микротрещин в армированных стекловолокном полимерно-песчано-бетонных композитах, а также изучали влияние стеклянных волокон на повышение прочности и трещиностойкости бетона. В работе [9] изучали воздействие добавления углеродных волокон на механические свойства и микроструктуру карбонатного бетона, армированного углеродным волокном, с использованием механических экспериментов, рентгеновской дифрактометрии, цифровой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Добавление указанных волокон может повысить прочность бетона на сжатие, растяжение и раскалывание. Методы улучшения механических свойств карбонатных бетонов путем введения добавок представляют особый интерес. В работе [10] изучали влияние добавления золы-уноса, доменного шлака и метаксаолина на механические свойства, усадку при высыхании, карбонизацию и проницаемость для хлорид-ионов гидротехнического песчаного бетона (HSC) и сравнили результаты с обычным портландцементом (ОПЦ) и бетоном на натуральных заполнителях (NAC). В итоге заключили, что прочность на сжатие у HSC была несколько ниже, но он обладал лучшей проницаемостью для хлорид-ионов. В

работах [11–14] исследовались ударная выносливость и динамическая прочность бетонов при разных условиях нагружения, в том числе бетонов, изготовленных на основе стальной фибры в условиях одноосного импульсного сжатия. В настоящей работе в качестве микронаполнителя применяли известняковый тонкодисперсный порошок. Основой известнякового наполнителя является карбонат кальция CaCO_3 . Исследования показали, что известняковый порошок положительно влияет на механические и реологические свойства бетона. Оценить, в каких пропорциях в составе бетона и до каких пределов известняковый тонкодисперсный порошок совместно с суперпластификатором позволяет улучшить динамические свойства карбонатного композита, – цель настоящего исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были проведены квазистатические, слабоинтенсивные динамические и статические испытания кубов – образцов карбонатного бетона с различным содержанием известнякового микронаполнителя. Для мониторинга процесса динамического разрушения и образования полей деформаций бетона была применена фото- и видеофиксация. Известняковый наполнитель изготавливали дроблением и последующим помолом карбонатного щебня. Заполнитель – продукт дробления карбонатного щебня – зерна известняка размером от 5 до 0,05 мм. Девять бетонных кубиков размерами $10 \times 10 \times 10$ см были испытаны на слабоинтенсивное динамическое и статическое сжатие. У трех кубиков был базовый состав смеси (без известнякового наполнителя). Шесть образцов содержали известняковый наполнитель. Составы бетона приведены в табл. 1.

Таблица 1

Опытные составы, кг/м³ смеси

Компонент смеси	Состав		
	Базовый	№ 1	№ 2
Цемент	415	472	336
Песок	150	–	–
Заполнитель (крошка из силикатного бетона)	1070	–	–
Известняковый заполнитель	–	1528	1528
Известняковый наполнитель	–	200	336
Суперпластификатор СП-1	3,94	5,04	2,6
Вода	180	295	333
Водоцементное соотношение	0,43	0,44	0,5

Бетон при динамическом воздействии ведет себя по-разному. Образец может разрушиться и при возрастании динамической нагрузки, и при ее спаде. Если воздействие импульсное, то при превышении значения статической разрушающей нагрузки испытываемый образец может и не разрушиться. В качестве критерия, определяющего поведение бетона при слабоинтенсивном динамическом сжатии, был принят приведенный коэффициент динамического упрочнения (ПКДУ). Мы рассчитывали ПКДУ косвенно, по интегрированной формуле, в которой напряжение, соответствующее моменту начала трещинообразования (трещинообразующее), берется в качестве маркера (верхней планки) процесса микроструктурного упрочнения бетона (динамической реструктуризации). При

этом третье квадратичное слагаемое в базовой формуле [13] заменяется десятичным логарифмом соотношения значений данного напряжения и предела прочности на сжатие [11–14]:

$$\text{ПКДУ} = 1,58 - 0,35 \lg \tau + \lg \left(\frac{\sigma_s}{R} \right),$$

где τ – продолжительность возрастания нагрузки, мс, от нуля до разрушения образца (при ударном сжатии – среднее время разрушения; рассчитывалась по стандартной методике с учетом размеров и массы сменного ударного наконечника и упругих характеристик материала опытных образцов [12–14]); σ_s – напряжение, соответствующее началу трещинообразования бетона, МПа; R – прочность бетона при сжатии, МПа.

Опытные образцы-кубы всех трех составов (рис. 1) испытывали на специальном устройстве рамного типа (рис. 2). Высота подъема груза составила 10–30 см, масса груза в копре варьировалась от 5 до 20 кг. Прочность определяли с помощью гидравлического пресса (рис. 3).



Рис. 1. Опытные образцы-кубы



Рис. 2. Ударная установка с образцом-кубом для испытания на ударное сжатие



Рис. 3. Гидравлический пресс для испытания на статическое сжатие

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенные результаты испытаний серий опытных образцов-кубов на динамическое нагружение с указанием свойств бетона даны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Напряжения диапазона упрочнения

Состав	Напряжение σ_s , соответствующее началу трещинообразования бетона, МПа	Продолжительность прироста нагрузки (среднее время разрушения) τ , мс	Прочность на осевое сжатие R , МПа
Базовый	33,1	5	52,1
№ 1	36,4	8	44,1
№ 2	31,3	10	37,2

Таблица 3

Значения показателя

Наименование показателя	Состав бетона		
	Базовый	№ 1	№ 2
Приведенный коэффициент динамического упрочнения	0,684	1,181	1,155

Из анализа результатов видно, что чем больше разрыв значений между напряжениями начала процесса микротрещинообразования в бетоне и пределом прочности на сжатие и выше скорость удара, тем больше значения ПКДУ.

Скол опытного образца после разрушения представлен на рис. 4.

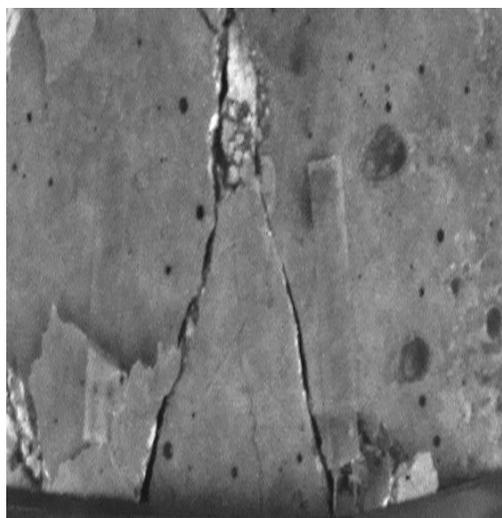


Рис. 4. Образец после разрушения с трещиной скола при ударном сжатии

Чем выше доля карбонатного наполнителя в бетоне, тем больше значение ПКДУ. Комплексная добавка из наполнителя и суперпластификатора способствует формированию пластических микроцентров в матрице бетона, тем самым повышая свойства демпфирования ударной нагрузки и значение коэффициента.

Приведенный коэффициент динамического упрочнения характеризует деформационную способность образцов воспринимать удар. Известняковый микронаполнитель увеличивает скорость поглощения энергии удара бетона образцов-кубов, тем самым улучшая процесс внутренней реструктуризации матрицы композита и способствуя ее упрочнению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты показывают, что степень динамического упрочнения при приведенной оценке зависит от скорости деформации и соотношения значений трещинообразующих напряжений и предела прочности на сжатие. Данный вывод в настоящем исследовании оправдан только для слабоинтенсивного осевого ударного сжатия. Динамические характеристики при разрушении, степень фрагментации, энергия поглощения возрастают, в то время как поглощающая способность уменьшается с увеличением скорости деформации. Метод изучения и выводы имеют решающее значение для определения динамических свойств других хрупких материалов. Испытания свидетельствуют о существовании верхнего предела содержания карбонатного микронаполнителя в составе бетона, соответствующего оптимальному проценту (22 %), при котором ПКДУ достигает своего максимума (ПКДУ = 1,181). Иными словами, прочность на ударное слабоинтенсивное сжатие на 18 % больше прочности на статическое сжатие. Оба вида бетона (базовый и карбонатный) являются материалами, чувствительными к скорости нагружения и уровню деформации. Общая степень упрочнения композита растет с увеличением скорости изменения энергии удара и возрастанием содержания демпфирующей добавки из микронаполнителя и суперпластификатора. Карбонатный бетон с добавкой из известнякового наполнителя и суперпластификатора в оптимальной дозе (22 %) обладает более высокими показателями динамической реструктуризации и упрочнения, что делает его эффективным при применении в конструкциях, работающих в условиях слабоинтенсивного ударного сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split hopkinson pressure bar // *Experimental Mechanics*. 2002. Vol. 42, pp. 93–106.
2. Ma H., Yue C., Yu H., Mei Q., Chen L., Zhang J., Zhang Y., Jiang X. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 137, pp. 103466.
3. Da B., Yu H., Ma H., Tan Y., Mi R., Dou X. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122, pp. 81–89.
4. Liu J., Ou Z., Peng W., Guo T., Deng W., Chen Y. Literature review of coral concrete // *Arabian Journal for Science. Engineering*. 2018. Vol. 43, pp. 1529–1541.

5. Xi-Bing L., De-Sheng G., Hai-Hui L. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rocks by SHPB // *Journal of Explosion and Shock Waves*. 1993. № 13 (2), pp. 125–130.
6. Zou J., Li S. Theoretical solution for displacement and stress in strain-softening surrounding rock under hydraulic-mechanical coupling // *Science China Technological Sciences*. 2015. Vol. 58. № 8, pp. 1401–1413.
7. Jin-Feng Z., Yu S. Theoretical solutions of a circular tunnel with the influence of the out-of-plane stress based on the generalized hoek-brown failure criterion // *International Journal of Geomechanics*. 2016. Vol. 16. № 3, pp. 06015006.
8. Xin L., Xu Y., Bai E., Li W. Mechanical properties of ceramic porous cement-based material subjected to impact loads // *Materials & Design*. 2014. № 55, pp. 778–784.
9. Alam S.Y., Kotronis P., Loukili A. Crack propagation and size effect in concrete using a non-local damage model // *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. № 109, pp. 246–261.
10. Alam S.Y., Loukili A. Transition from energy dissipative processes to displacement discontinuities during concrete failure. URL: https://www.researchgate.net/publication/303514585_Transition_from_energy_dissipative_processes_to_displacement_discontinuities_during_concrete_failure (дата обращения: 29.05.2024).
11. Gary G., Bailly P. Behaviour of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling // *Eur. J. Mech.* 1998. Vol. 17 (3), pp. 403–420.
12. Парфенов А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры. Дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 178 с.
13. Никулин А.И. О динамической прочности бетона при неоднородном импульсном сжатии // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 1. С. 77–81.
14. Цветков К.А. Влияние динамического нагружения на прочностные и деформативные свойства бетона при одноосных и двухосных напряженных состояниях. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2004. 25 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

СИЗОВ Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Куляев П.В., Сизов Ю.В. Динамические свойства карбонатного бетона в условиях слабоинтенсивного ударного сжатия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 25–32.

**DYNAMIC PROPERTIES OF CARBONATE CONCRETE
UNDER LOW-INTENSITY IMPACT COMPRESSION**

P.V. Kulyaev, Yu.V. Sizov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The dynamic and static properties of carbonate concrete based on a complex additive of fine limestone powder and superplasticizer using low-intensity shock compression of cube samples in the axial direction have been studied. It is noted that the development of high-impact concrete compositions serves as the basis for the development and application of local mineral resources. It is indicated that compliance with the principle of using local materials in the manufacture of concrete based on limestone fine powder, which meets the requirements of economical design of objects exposed to impact, can significantly reduce the time and cost of construction and increase durability. It is concluded that with a limestone powder content of up to 25 %, the dynamic characteristics smoothly pass their peak values. It is shown that with an increase in the content of limestone powder within a given volume, the coefficient of dynamic hardening of concrete first increased, then decreased and reached its maximum value with a limestone powder content of 22 %.

Keywords: deformation rate, dynamic modulus of elasticity, reduced coefficient of dynamic hardening.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KULYAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

SIZOV Yuri Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kulyaev P.V., Sizov Yu.V. Dynamic properties of carbonate concrete under low-intensity impact compression // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 25–32.

УДК 691

**ЗОЛОЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ
ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ГИДРОУДАЛЕНИЯ***В.Б. Петропавловская, Х.А. Микаелян,
К.С. Петропавловский, Т.Б. Новиченкова**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Петропавловская В.Б., Микаелян Х.А.,
Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., 2024

Аннотация. Отмечено, что решать материаловедческую задачу по формированию структуры композиционных материалов, отвечающих требованиям принципов устойчивого развития, путем формирования новейших подходов к разработке низкоуглеродистых композиционных вяжущих необходимо совместно с задачей рационального использования природных ресурсов за счет вовлечения многотоннажных объемов отходов промышленного производства. Приведены результаты исследования влияния алюмосиликатного зольного продукта на свойства золоцементного вяжущего. Сделан вывод, что алюмосиликатный продукт обогащения золошлаковыми отходами не оказывает негативного воздействия на процесс структурообразования искусственного золоцементного камня. В ходе испытаний золоцементной композиции на равномерность изменения объема было установлено, что продукт благоприятно воздействует на твердение золоцементного камня.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, устойчивое развитие, композиционные вяжущие.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-33-41**ВВЕДЕНИЕ**

В сферу наиболее актуальных задач строительного материаловедения в настоящее время входят вопросы получения вяжущих и бетонов, в полной мере отвечающих приоритетным целям устойчивого развития ООН [1].

В рамках обеспечения использования рациональных моделей потребления и производства необходимо исследовать всевозможные отходы промышленности для замены природного сырья в производстве строительных материалов. Это позволит сохранить природную среду, улучшить экологическую обстановку, сократить выбросы углекислого газа, а также уменьшить площади, занимаемые отходами. Так, в результате деятельности предприятий топливно-энергетического комплекса и горнодобывающей промышленности образуются многотоннажные отходы золы [1–6]. Они занимают значительную территорию, могут служить причиной многих серьезных природных катастроф, загрязняют воздух и источники воды [11, 12]. В то же время вышеназванные отходы могут быть успешно использованы в строительной индустрии, которая постоянно нуждается в больших объемах сырьевых ресурсов [1, 5, 6, 9–11]. Так, цемент и бетон способны «поглотить» значительную долю дисперсных отходов промышленности; особую значимость имеют золы ТЭС, потребляемая при производстве цемента доля которых составляет сегодня около 5 %.

Иными словами, известны технологии применения отходов золы в производстве цемента. Поскольку при изготовлении портландцемента одной из основных задач является борьба с выбросами диоксида углерода, то вовлечение отходов золы как компонента вяжущего даст шанс снизить негативное воздействие этого диоксида. Так, согласно статистическим данным, около 60 % выбросов диоксида углерода приходится на обжиг известняка. Последний служит основным сырьем в производстве портландцементного клинкера. Известно, что в ходе получения 1 т цемента образуется 918 кг CO_2 [10], а выделение CO_2 оказывает парниковый эффект и вызывает глобальное потепление.

Вовлечение максимально возможного объема зол и шлаков [1, 13–14] в производство такого нужного вяжущего, как цемент, позволит улучшить экологическую обстановку и снизить выбросы CO_2 . Но эти техногенные ресурсы могут стать ценным компонентом не только цементных смесей и бетонов, но и других востребованных строительных материалов (геополимеров, газобетона, силикатных и керамических изделий) [1]. Подобное применение зол и шлаков – актуальная тема, так как только на территории Российской Федерации накоплено около 1,6 млрд т золошлаковых отходов (ЗШО), а годовой объем образования ЗШО составляет до 80 млн т [1].

Состояние золы или шлака может потребовать проведения дополнительного обогащения или внедрения вспомогательных операций. Поскольку сжигание угля приводит к образованию ЗШО со сложным составом, то есть в основном содержащих несгоревший углерод (5–25 %), летучую золу (30–80 %) и шлак (10–70 %) (все зависит от типа угля и процесса сжигания) [3], то разделение компонентов отходов будет способствовать наиболее эффективной утилизации, что повысит качество конечного продукта и процент использования зольных отходов [13]. Так, совместное применение цементного вяжущего, обогащенной золы, известняка и химической добавки отражается на интенсификации процессов гидратации композиционного вяжущего при твердении и увеличивает его активность до 62 %, как показывают исследования [10]. Прочность цемента с добавкой обогащенной золы в возрасте 3 сут естественного твердения в 2 раза превышает прочность контрольного состава. Но ученые отмечают и изменение реологических свойств цементной смеси. Такие исследования, как и многие другие, посвящены наиболее востребованным и изученным отходам золы-уноса (летучей золы) с высоким содержанием кальция. Менее изучены кислые золы с низким содержанием кальция. Данный вид отходов в современных строительных технологиях не находит широкого применения, так как для его хранения нужны огромные площади. К тому же по технологии такой зольный отход удаляется с помощью воды, что отражается на его свойствах. В результате зола характеризуется неоднородным составом, а также наличием достаточно большого объема примесей.

Вызывает трудности в переработке указанных зольных отходов при производстве современных цементов и бетонов непостоянный состав частиц по размерам. В первую очередь это касается содержания частиц в диапазоне наиболее крупных фракций в составе золошлаковой смеси [8]. Они содержат наиболее «критичные» фракции с высоким содержанием расплава.

Чтобы получить композиционное вяжущее с высокими эксплуатационными свойствами на основе компонентов ЗШО, в работе исследовалось влияние алюмосиликатного зольного продукта на свойства золоцементного вяжущего.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Была использована зольная фракция с размерами зерен 0–120 мкм, которая прошла обработку. Ее разделили на отдельные компоненты. После физико-химической обработки было достигнуто высокое качество ультрадисперсного зольного порошка. Он имеет достаточно стабильные химические и физико-механические свойства. Предлагаемая обработка зольного порошка позволяет в дисперсной системе получать структуру с большим числом контактов. Ультрадисперсный состав зольного порошка требует дополнительной пластификации дисперсной системы. Несмотря на то что в процессе дополнительного помола происходит разрушение оставшихся после обработки крупнопористых частиц, введение пластификатора способствует улучшению реологических характеристик композиций, а следовательно, повышению прочности и плотности модифицированного цементного камня с добавкой микронаполнителя.

В целях замены части цемента высокодисперсным отходом в работе исследовалась возможность использования для этого зольного обогащенного продукта переработки золошлаковых смесей ТЭС. Продукт был получен методом флотации. Для изучения была выбрана зола ТЭС Московской области. Зола образовалась в результате сжигания бурых углей и гидроудаления отходов этого сжигания. Вовлечение составляющих золошлаковых отходов ТЭС для модификации и повышения эффективности цементных вяжущих – актуальная задача в настоящее время как для России, так и для других стран, имеющих значительные объемы подобных отходов [1, 11–13].

Природа сжигаемого топлива и способ удаления продуктов сжигания отразились на химическом и минералогическом составе кислой золы: в составе преобладают алюминатные и силикатные фазы с небольшим содержанием кальциевых и магниевых фаз.

Как и другие золы от сжигания углей, исследуемая золошлаковая смесь имеет минеральную и органическую составляющие.

В ходе флотации золошлаковый отход разделяется на несколько отдельных частей: углеродную, алюмосиликатную, железосодержащую. Это отражается на химическом составе каждого из продуктов обогащения.

В результате обогащения и магнитной сепарации в заводских условиях были получены различные зольные продукты. В данном исследовании применялась алюмосиликатная составляющая. Основными компонентами, содержащимися в алюмосиликатном продукте, являются SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , которые в сумме составили 87–96 %. Содержание оксидов кальция и магния в сумме варьировалось в пределах 4–8 %. Сумма оксидов K_2O и Na_2O невелика и не превысила 2–3 %. Содержание серы в золе находилось в диапазоне 0,1–0,16 %. Содержание таких оксидов, как P_2O_5 , MnO , TiO_2 , составило менее 1 %.

Отход имеет гранулометрический состав (рис. 1) со средним размером частиц 13,56 мкм. В качестве основного компонента использовали цементное вяжущее. Свойства цементного вяжущего ExtraCEM 500 приведены в таблице.

Характеристики портландцемента ExtraCEM 500

Свойство	Единица измерения	Величина
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Класс по прочности	–	42,5Б
Предел прочности при сжатии в возрасте 2 сут	МПа	26,2

Окончание таблицы

1	2	3
Предел прочности при изгибе в возрасте 2 сут	МПа	4,9
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут	МПа	49,1
Предел прочности при изгибе в возрасте 28 сут	МПа	7,6

Испытания физико-механических свойств золоцементного камня проводились с использованием аттестованных методик и образцов размерами $20 \times 20 \times 20$ мм (рис. 2). Изучалось влияние зольного продукта на прочность, плотность и равномерность изменения объема золоцементного камня (рис. 3) с содержанием алюмосиликатного компонента золошлаковой смеси в количестве 30 % от массы цемента, поскольку смесь может заменить часть портландцемента в составе вяжущего благодаря близости химического состава подобных смесей к глинам (при этом не требуется расходовать энергию на дегидратацию).

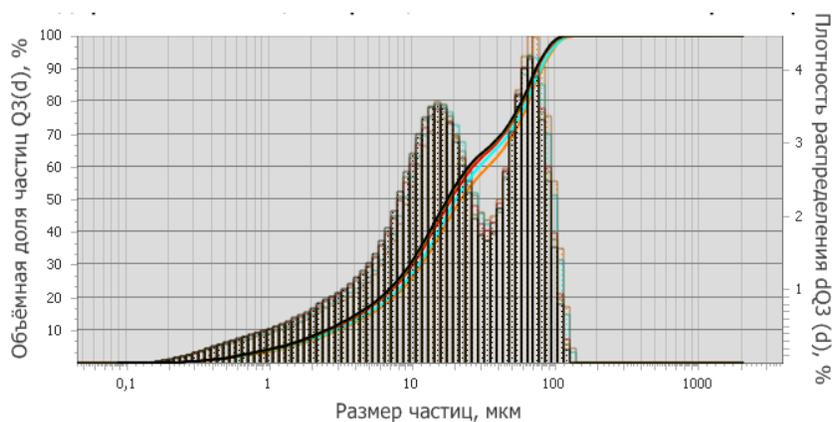


Рис. 1. Распределение частиц по размерам в составе алюмосиликатной части золошлаковой смеси ТЭС Московской области



а



б

Рис. 2. Внешний вид золоцементного искусственного камня:
а – до разрушения при испытании; б – после разрушения

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных результатов физико-химических исследований образцов золоцементного камня показал, что алюмосиликатный продукт обогащения ЗШО не оказывает негативного воздействия на процесс структурообразования искусственного золоцементного камня (рис. 3). В ходе испытаний золоцементной композиции на равномерность изменения объема установлено, что продукт благоприятно сказывается на твердении золоцементного камня. На образцах не обнаружены радиальные трещины; нет трещин, доходящих до краев, а также трещин или сетки мелких трещин, видимых невооруженным глазом или с помощью лупы. Не найдены на поверхности образцов какие-либо искривления и увеличение их объема.



Рис. 3. Внешний вид и поверхность образцов золоцементной композиции после испытаний

Были также исследованы основные физико-механические характеристики золоцементной структуры согласно требованиям соответствующих ГОСТов. Были получены закономерности влияния содержания переработанного продукта топливных отходов ТЭС Московской области (алюмосиликатной добавки) и водотвердого отношения на предел прочности (рис. 4) и среднюю плотность (рис. 5) искусственного камня.

Установлено, что введение добавки алюмосиликатного компонента увеличивает прочность камня в случае небольших значений водотвердого отношения, тогда как при повышенных значениях указанного отношения характер зависимости меняется.

В случае малых (в пределах изученного диапазона) значений водотвердого отношения проявляются наилучшие свойства алюмосиликатных микросфер; эти микросферы положительно влияют на реологические свойства смеси. В случае больших значений водотвердого отношения позитивные свойства нивелируются из-за высокого содержания воды, создающей структуру с повышенной пористостью.

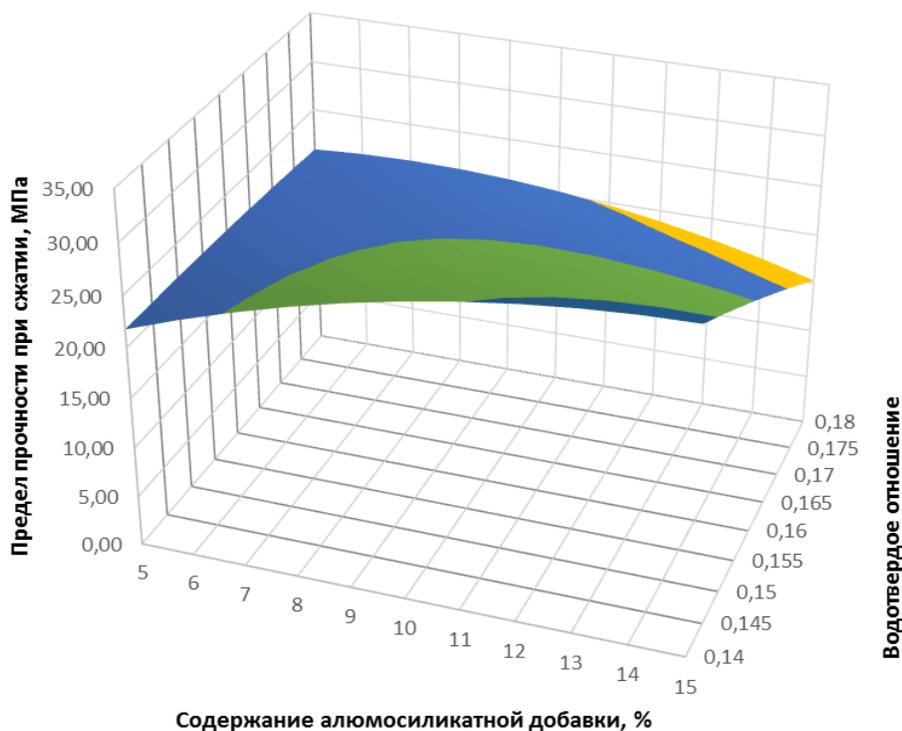


Рис. 4. Влияние содержания алюмосиликатной добавки на прочность образцов золоцементной композиции

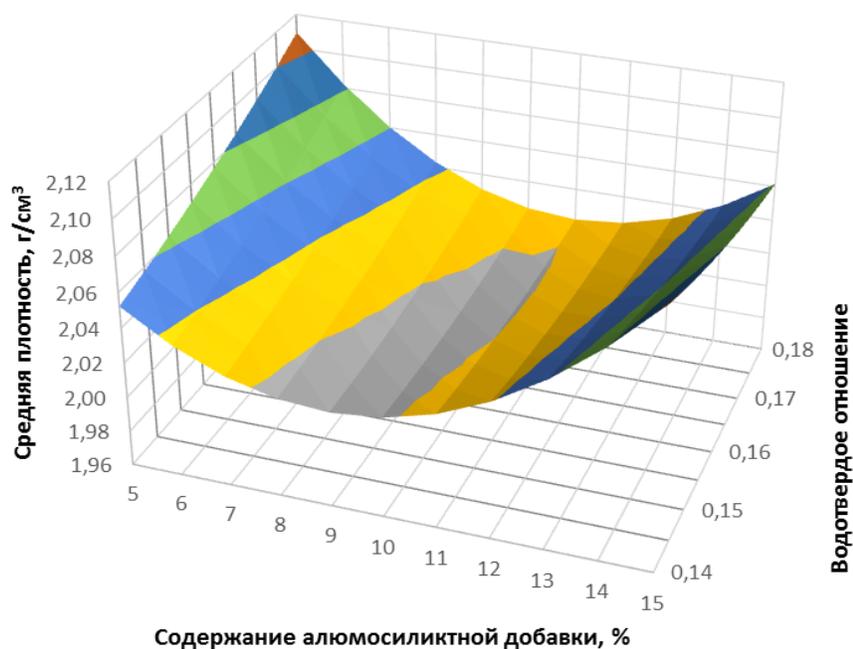


Рис. 5. Влияние содержания зольного продукта на плотность образцов золоцементной композиции

Исследования пористости подтверждают результаты изучения прочности при высоких значениях водотвердого отношения. Характер зависимости плотности от водотвердого отношения такой же, как у зависимости прочности от указанного отношения при максимальном содержании алюмосиликатной добавки. Однако при малом содержании микросфер зависимость плотности от этого отношения иная. Средняя плотность при увеличении водосодержания возрастает до максимального значения. Следовательно, наилучшие результаты по критериям плотности и прочности были достигнуты для состава с максимальным количеством микросфер при минимальном содержании воды. Отметим, что исследования будут продолжены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, доказано, что введение переработанного продукта топливных отходов ТЭС Московской области повышает экономическую эффективность материала, что является положительным аспектом утилизации данного отхода в производстве золоцементного вяжущего.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-49-03004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yatsenko E.A., Goltzman B.M., Izvarin A.I., Kurdashov V.M., Smoliy V.A., Ryabova A.V., Klimova L.V. Recycling ash and slag waste from thermal power plants to produce foamed geopolymers // *Energies*. 2023. № 16 (22), pp. 7535.
2. Makul N., Fediuk R., Amran M., Al-Akwa M.S., Pralat K., Nemova D., Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M. Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 21.
3. Макаренко С.В., Байшев Д.И., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Влияние зол-уноса и золошлаковых смесей ТЭС ОАО «Иркутскэнерго» на свойства цемента // *Известия КГАСУ*. 2014. № 4 (30). С. 278–283.
4. Buryanov A., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Simulating the structure of gypsum composites using pulverized basalt waste. URL: https://www.researchgate.net/publication/318657163_Simulating_the_structure_of_gypsum_composites_using_pulverized_basalt_waste (дата обращения: 11.08.2024).
5. Цырятьева А.В. Зола гидроудаления как компонент геополимеров. *Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий: Материалы межрегиональной научно-технической конференции молодых ученых, специалистов и студентов вузов*. Апатиты: ФГБУН ИХТРЭМС КНЦ РАН, 2015. С. 134–138.
6. Салиева М.Г. Некоторые аспекты использования золы гидроудаления в строительной индустрии // *Материаловедение*. 2019. № 2 (30). С. 101–103.
7. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Sidorov A., Petropavlovskii K. Ultra-dispersed ash filler for dispersed binding systems // *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 88, pp. 1003–1008.
8. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Corrosion resistant fine-grained ash concrete for repairs of constructions in the linen production // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926, pp. 012045.

9. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Aleksandrova O., Fischer H. Application of fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736.
10. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Aleksandrova O., Fischer H. Application of fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736.
11. Sotnikova O., Zhidko E., Tenyachkin S. The use of ash and slag waste in the production of building materials // *Modern Problems in Construction*. 2022. Vol. 287, pp. 311–320.
12. Fediuk R., Makarova N., Qader D., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. № 23, pp. 2642–2657.
13. Quang N.D.V., Fedosov S.V., Aleksandrova O.V., Lukyanova N.A. The effect of mineral admixtures and fine aggregates on the characteristics of high-strength fiber-reinforced concrete // *Materials*. 2022. Vol. 15, pp. 8851.
14. Koo Kyung Mo, Ahn Sang Hyeok, Han Gyu Young, Park Dong Cheol, Park Jae Beom. Rapid hardening cement composition modified concrete composition comprising the same and road pavement method using the same. URL: <https://typeset.io/papers/rapid-hardening-cement-composition-modified-concrete-33lecnpzip> (дата обращения: 11.08.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

МИКАЕЛЯН Хачатур Арсенович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xach200@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института нано- и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловская В.Б., Микаелян Х.А., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Золоцементные композиции на основе золошлаковых отходов гидроудаления // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 33–41.

ASH CEMENT COMPOSITIONS ON THE BASIS OF ASH AND SLAG WASTES OF HYDROPOWER REMOVAL

*V.B. Petropavlovskaya, Kh.A. Mikaelyan,
K.S. Petropavlovskii, T.B. Novichenkova
Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. It is noted that it is necessary to solve the material science problem of forming the structure of composite materials that meet the requirements of the principles of sustainable development by forming the latest approaches to the development of low-carbon composite binders together with the task of rational use of natural resources through the involvement of multi-tonnage volumes of industrial waste. The results of investigation of the influence of aluminosilicate ash product on the properties of ash cement binder are given. It is concluded that the aluminosilicate product of ash and slag waste enrichment does not have a negative impact on the process of structure formation of artificial ash cement stone. During the tests of ash and cement composition on the uniformity of volume change it was found that the product has a favorable effect on the hardening of ash and cement stone.

Keywords: ash and slag waste, sustainable development, composite binders.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

MIKAELIAN Khachatur Arsenovich – Master’s Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xach200@mail.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Petropavlovskaya V.B., Mikaelyan Kh.A., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. Ash cement compositions on the basis of ash and slag wastes of hydropower removal // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 33–41.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 537.523

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ОЗОНАТОРА*Д.В. Максудов**Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа)*

© Максудов Д.В., 2024

Аннотация. Представлена конструкция озонатора сотовой структуры. Разработан итерационный алгоритм, в результате работы которого для данного озонатора были получены графики зависимости критической частоты от амплитуды питающего напряжения, а также от температуры, состава и давления газовой смеси.

Ключевые слова: озонатор, сотовая структура, газоразрядные процессы, критическая частота, итерационный алгоритм.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-42-50**ВВЕДЕНИЕ**

Частота изменения внешнего напряжения является одним из факторов, влияющих на образование озона в барьерном разряде и эффективность данного химического элемента. Изучению указанного влияния посвящены многие научные исследования [1–13].

Рост частоты в пределах 10^6 Гц приводит к увеличению производительности озонатора, поскольку мощность барьерного разряда пропорциональна частоте (при этом, однако, должно выполняться качественное отведение образующегося тепла, поскольку повышение температуры приводит к быстрой диссоциации молекул озона). Как показали экспериментальные исследования [6], при превышении частотой некоего критического значения (около 10^6 Гц) производительность озонатора резко падает, а удельные затраты энергии для получения озона существенно возрастают. Причиной описанного явления служит относительно низкая подвижность ионов (в сравнении с электронами), вследствие чего при достаточно высокой частоте ионы не успевают пересечь разрядный промежуток и осесть на электродах за время полупериода изменения внешнего напряжения. Это, в свою очередь, стабилизирует положение каналов микрозарядов в пространстве и снижает эффективность образования озона из-за локализации барьерного разряда в небольшой части объема газовой смеси.

Таким образом, актуальной задачей является определение критической частоты, что представляет интерес с точки зрения оптимизации частоты питающего напряжения озонатора по критерию минимизации удельных затрат энергии при синтезе озона.

КОНСТРУКЦИЯ ОЗОНАТОРА СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

На рис. 1 представлена конструкция озонатора сотовой структуры, для которого проводилось математическое моделирование с целью определения критической частоты. Данная конструкция была разработана на кафедре электромеханики Уфимского университета науки и технологий.

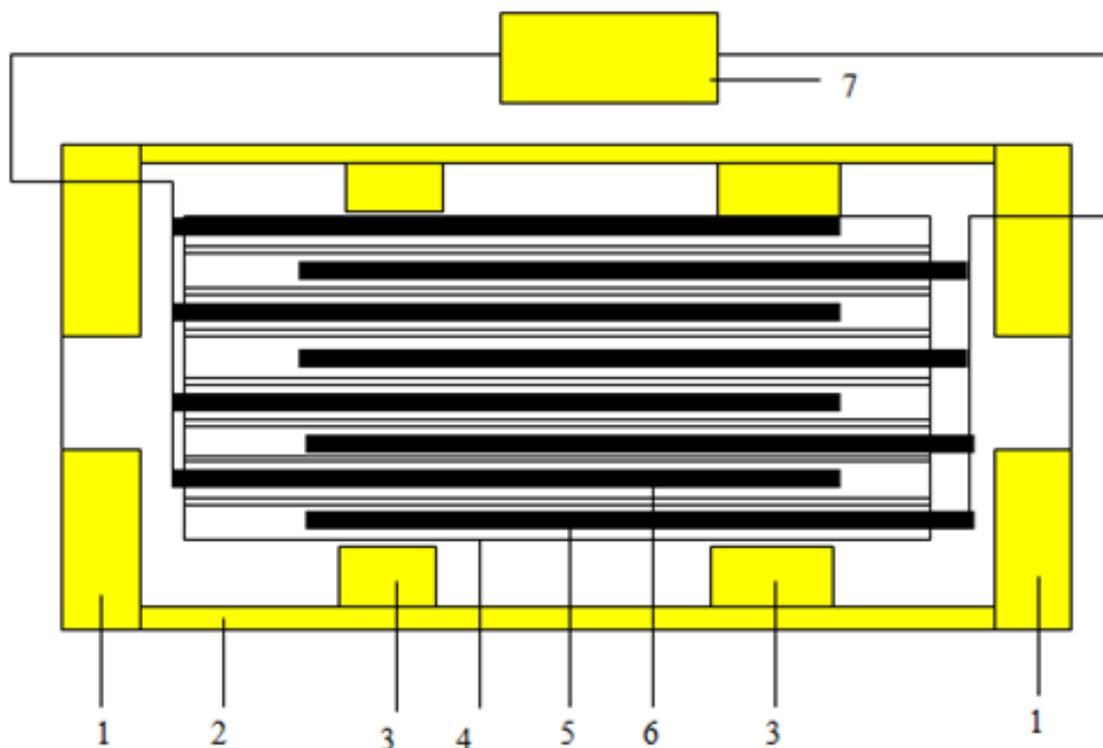


Рис. 1. Озонатор сотовой структуры в продольном разрезе:
1 – фланцы; 2 – диэлектрический корпус; 3 – изолирующие стойки;
4 – диэлектрик-катализатор сотовой структуры;
5, 6 – группы электродов разных потенциалов;
7 – высокочастотный источник переменного тока

Конструкция включает в себя диэлектрический блок сотовой структуры, в каналы которого в шахматном порядке вложены группы электродов, подключенные к источнику питания. Вследствие разности потенциала между этими электродами возникает барьерный разряд, причем в качестве барьера выступают стенки каналов диэлектрического блока. Ионы, образовавшиеся при вышеназванном разряде, двигаются в направлении катода, сталкиваясь при этом с молекулами газовой смеси, находящейся в разрядном промежутке.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ

На длине свободного пробега λ ион приобретает энергию

$$E_{и} = \lambda e_{и} E = \frac{k T e_{и} E}{\sqrt{2} \pi d^2 p}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, $k \approx 1,3 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура, К; $e_{и}$ – заряд иона, $e_{и} = e_{эл}$; E – напряженность электрического поля в прикатодной области; d – кинетический диаметр молекул, м; p – давление, Па.

Распределение напряженности электрического поля для сечения канала диэлектрического блока 4 (см. рис. 1) имеет неоднородный характер и может быть найдено с использованием метода зеркальных отображений:

$$E(x, z) = \frac{U_0}{2 \ln \left(\frac{R + \delta}{R} \right)} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i|+|j|} \frac{1}{\sqrt{(x - 2jh)^2 + (z - 2ih)^2}} \right],$$

где x и z – координаты на плоскости сечения рассматриваемого канала диэлектрического блока относительно оси электрода радиуса R , такие, что $x^2 + z^2 > R^2$; $|x| < h$; $|y| < h$;

$$\beta = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_b}{\varepsilon_d + \varepsilon_b} \quad (\varepsilon_b - \text{диэлектрическая проницаемость газовой смеси в разрядном (воздушном)}$$

промежутке; ε_d – проницаемость диэлектрического барьера); h – половина ширины канала, м; U_0 – напряжение питания, В; δ – ширина разрядного промежутка,

$$\delta = \frac{h' - d_d (\sqrt{N} + 1)}{2\sqrt{N}} - R,$$

где h' – ширина каталитического блока, м; d_d – толщина слоя диэлектрика (толщина стенок канала), м; N – число каналов в каталитическом блоке сотовой структуры; R – радиус электрода, м.

Поскольку в масштабах, соизмеримых с длиной свободного пробега, изменение напряженности электрического поля пренебрежимо мало, энергия, приобретаемая ионом на пути между столкновениями с молекулами, может быть определена при подстановке в формулу (1) значения напряженности в точке с координатами x , y , соответствующей началу этого пути:

$$E_n(x, z) = \frac{kTe_n E(x, z)}{\sqrt{2\pi d^2 p}} = \frac{kTe_n U_0}{\sqrt{8\pi d^2 p} \ln \left(\frac{R + \delta}{R} \right)} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i|+|j|} \frac{1}{\sqrt{(x - 2jh)^2 + (z - 2ih)^2}} \right].$$

Под действием электрического поля ион (атом кислорода) приобретает скорость, которая намного больше скорости теплового движения молекул V_T при нормальной температуре. Например, при параметрах озонатора, приведенных в таблице, и при движении из точки с координатами $(R + \delta, 0)$ на длине свободного пробега скорость иона

$$V_{и, \max} = \sqrt{\frac{2E_n(R + \delta, 0)}{m_{и}}} = 2 \cdot 10^4 \text{ м/с, где } m_{и} - \text{масса иона (при этом средняя скорость}$$

$$\text{движения } V_{и, \text{ср}} = \sqrt{\frac{E_n(R + \delta, 0)}{2m_{и}}} = 9,8 \cdot 10^3 \text{ м/с).}$$

Параметры озонатора

Параметр	Значение
Длина каталитического блока l , м	0,15
Высота / ширина каталитического блока h , м	0,07
Число каналов N	225
Толщина слоя диэлектрика D_d , м	10^{-3}
Напряжение источника питания U_0 , кВ	15

Поскольку скорость теплового движения $V_T \ll V_{и,макс}$, после столкновения иона (атома кислорода) с двухатомной молекулой кислорода, имеющей массу $m_{O_2} \approx 2m_и$, скорости иона $V'_и$ и молекулы V'_{O_2} определяются по формулам:

$$V'_и = \frac{2m_{O_2}V_T + V_{и,макс}(m_и - m_{O_2})}{m_и + m_{O_2}} \approx \frac{-m_иV_{и,макс}}{3m_и} = -\frac{1}{3}V_{и,макс}; \quad (2)$$

$$V'_{O_2} = \frac{2m_иV_{и,макс} + V_T(m_{O_2} - m_и)}{m_и + m_{O_2}} \approx \frac{2m_иV_{и,макс}}{3m_и} = \frac{2}{3}V_{и,макс}. \quad (3)$$

Использованные формулы (2) и (3) описывают изменение скоростей при столкновении иона с двухатомной молекулой кислорода. В случае если в канале микроразряда присутствуют также молекулы озона, то с учетом отношения $m_{O_3} \approx 3m_и$ и $V_{и,макс} \gg V_T$ конечная скорость иона после его столкновения с такими молекулами

$$V'_и = \frac{2m_{O_3}V_{и,макс} + V_{и,макс}(m_и - m_{O_3})}{m_и + m_{O_3}} \approx \frac{-2m_иV_{и,макс}}{4m_и} = -\frac{1}{2}V_{и,макс}; \quad (4)$$

скорость же молекулы озона

$$V'_{O_3} = \frac{2m_иV_{и,макс} + V_{и,макс}(m_{O_3} - m_и)}{m_и + m_{O_3}} \approx \frac{2m_иV_{и,макс}}{4m_и} = \frac{1}{2}V_{и,макс}. \quad (5)$$

Таким образом, при описанном соударении ион отскакивает от молекулы озона и движется в противоположном направлении со скоростью, примерно равной половине исходной.

С учетом выражений (2)–(5) для моделирования движения иона в разрядном промежутке может быть применен итерационный процесс. Например, при движении по траектории 1 (рис. 2) этот итерационный процесс имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 V_{и, \max}^{(0)} &= 0; \quad x^{(0)} = R + \delta; \\
 z^{(0)} &= 0; \quad t^{(0)} = 0; \\
 V_{и, \max}^{(i+1)} &= \frac{2}{m_{и}} \left[\frac{kTe_{и}U_0}{\sqrt{8\pi d^2 p} \ln\left(\frac{R+\delta}{R}\right)} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i+j|} \frac{1}{\sqrt{(x-2jh)^2 + (z-2ih)^2}} \right] - \frac{m_{и} \left(\frac{V_{и, \max}^{(i)}}{\operatorname{Re}(\xi(i))} \right)^2}{2} \right]; \\
 V_{и, \text{cp}}^{(i+1)} &= \frac{V_{и, \max}^{(i+1)} - \frac{1}{\operatorname{Re}(\xi(i))} V_{и, \max}^{(i)}}{2}; \\
 x^{(i+1)} &= x^{(i)} - \lambda = x^{(i)} - \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 p}}; \\
 z^{(i+1)} &= z^{(i)}; \\
 t^{(i+1)} &= t^{(i)} + \frac{\lambda}{V_{и, \text{cp}}^{(i+1)}},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $\operatorname{Re}(\xi(i)) = \begin{cases} 2 & \text{если } \xi(i) = 0; \\ 3 & \text{если } \xi(i) > 0; \end{cases}$; $\xi(i)$ – случайная величина, принимающая на каждом

i -м шаге некое неотрицательное целое значение, равное нулю с вероятностью, равной мольной доле озона (в составе смеси, состоящей из двух- и трехатомных молекул кислорода); $t^{(i)}$ – время, прошедшее от момента начала движения иона до начала i -го итерационного шага; $V_{и, \text{cp}}^{(i)}$ – средняя скорость движения иона на i -м шаге; $V_{и, \max}^{(i)}$ – скорость движения иона к концу i -го шага; $x^{(i)}$, $z^{(i)}$ – координаты иона в начале i -го итерационного шага на плоскости сечения канала диэлектрического блока относительно точки пересечения данной плоскости с осью электрода, принятой за начало координат.

Итерационный процесс (6) продолжается, пока выполняется условие $x^{(i)} > R$, где R – радиус электрода.

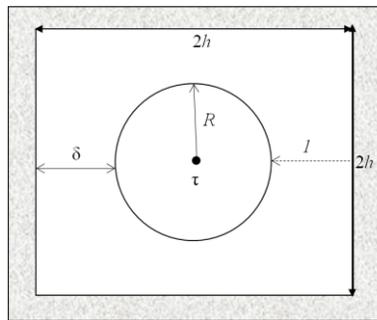


Рис. 2. Сечение канала диэлектрического блока

Итерационный процесс (6) был реализован средствами программирования в программном комплексе Mathcad. Результаты работы данного программного алгоритма для параметров озонатора, приведенных в таблице, даны на рис. 3–5.

На рис. 3а и 3б показаны зависимости скорости иона и величины пройденного им пути от времени его движения. На рис. 4а и 4б продемонстрирована зависимость критической частоты от величины питающего напряжения и давления газовой смеси.

Как видно из рис. 4а, с ростом напряжения происходит соответствующее увеличение критической частоты вследствие повышения напряженности электрического поля и скорости движения ионов.

С ростом давления сокращаются расстояние между молекулами газовой смеси и длина свободного пробега, а соответственно, снижается и скорость, которую ионы успевают набрать между столкновениями с молекулами. Следствием этого становится уменьшение критической частоты по мере роста давления газовой смеси, показанное на рис. 4б.

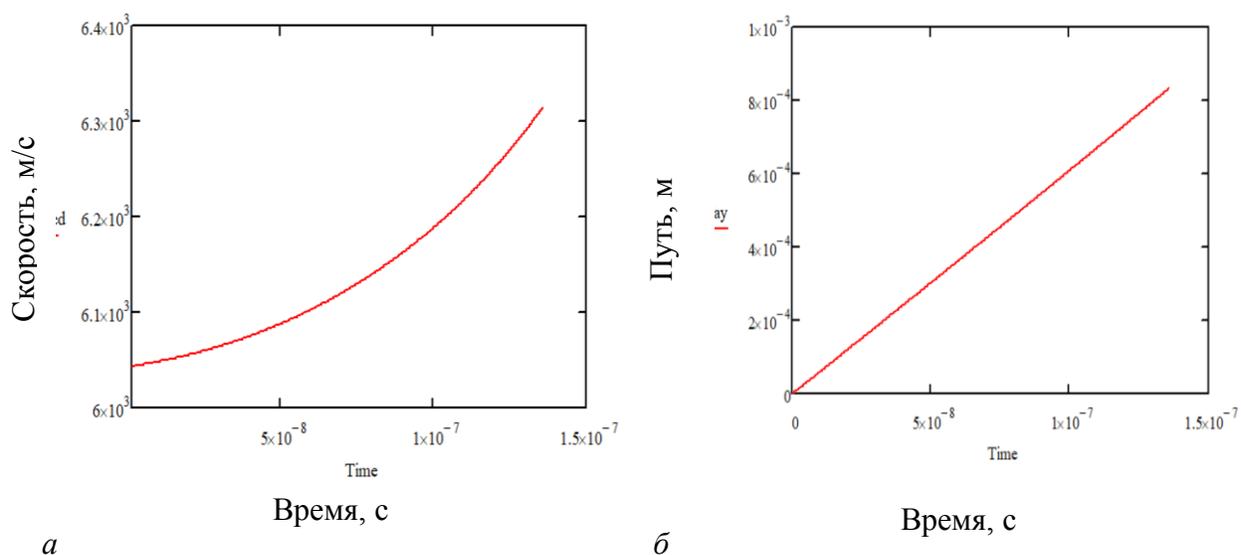


Рис. 3. График зависимости: а – скорости иона, м/с, от времени его движения, с; б – пути, пройденного ионом, м, от времени его движения, с

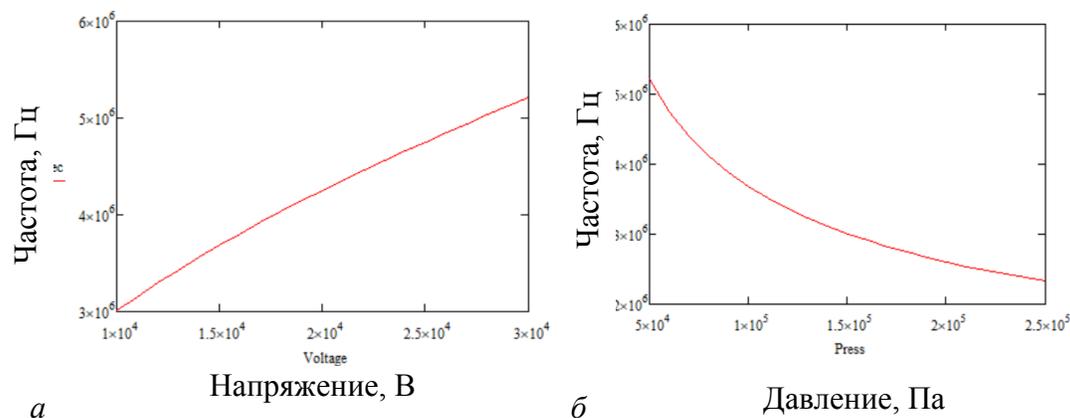


Рис. 4. График зависимости критической частоты, Гц: а – от питающего напряжения, В; б – давления газовой смеси в разрядном промежутке, Па

На рис. 5а приведена зависимость критической частоты от температуры газовой смеси. Диапазон температуры на графике выбран с учетом возможных ее значений в канале микроразряда.

С ростом температуры расстояние между молекулами газовой смеси и длина свободного пробега частиц также возрастают, что позволяет ионам набрать большую скорость на пути между соударениями. Следствием этого становится рост критической частоты, показанный на рис. 5а.

Результаты вычисления зависимости критической частоты от концентрации озона даны на рис. 5б.

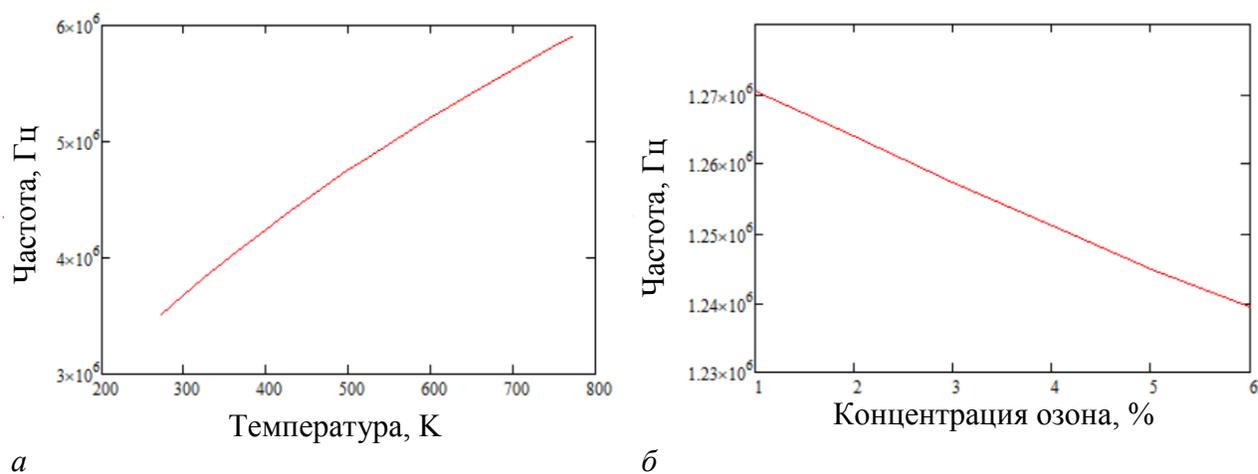


Рис. 5. График зависимости критической частоты, Гц:
а – от температуры газовой смеси в разрядном промежутке, К;
б – концентрации озона, %

Как видно из рис. 5б, с ростом концентрации озона снижается критическая частота. Это обусловлено тем, что инверсия скорости ионов при столкновении с молекулами озона больше, чем при столкновении с двухатомными молекулами кислорода, вследствие чего при увеличении концентрации озона происходит снижение средней скорости ионов и увеличение времени пересечения разрядного промежутка.

ВЫВОДЫ

Представлена конструкция озонатора сотовой структуры, разработанная на кафедре электромеханики Уфимского университета науки и технологий. В результате математического моделирования движения положительных ионов в разрядном промежутке данного озонатора разработан итерационный метод, позволяющий определить критическую частоту, при превышении которой ионы не успевают пересечь разрядный промежуток в течение полупериода приложенного напряжения, что приводит к снижению эффективности образования озона и росту удельных энергозатрат, необходимых для его синтеза.

Изучена зависимость критической частоты от различных факторов (амплитуды питающего напряжения, температуры и давления газовой смеси, концентрации озона в ней). Итоги данного исследования представляют интерес при решении задачи оптимизации режима работы озонатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.А. Положительный объемный заряд и характер снижения в области первой критической частоты // *ЖТФ*. 1967. Т. 37. Вып. 4. С. 710.
2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Энергия, 1989. 174 с.
3. Fatechand R.R.T. The electrical breakdown of gaseous dielectrics of high frequencies. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/pi-c.1957.0058> (дата обращения: 17.08.2024).
4. Kampshulte J., Luftdurchschlag und Überschlag von 50 und 100000 Hertz. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01657225> (дата обращения: 17.08.2024).
5. Lassen H. Frequenzabhängigkeit der Funkenspannung in Luft. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01657442> (дата обращения: 17.08.2024).
6. Aiba T., Freeman M.P. Mechanism of the Radiofrequency Ozonizer Discharge // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1974. Vol. 13. № 3, pp. 179–184.
7. Haverkamp R.G., Miller B.B., Free K. Ozone production in a high frequency dielectric barrier discharge generator. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Ozone-Production-in-a-High-Frequency-Dielectric-Haverkamp-Miller/8de9b506e14b71a7605cbced769c1d4162676e76> (дата обращения: 17.08.2024).
8. Zhehua Du, Xin Lin. Characteristic research on the generation of ozone using dielectric barrier discharge. URL: https://www.researchgate.net/publication/334694100_Characteristic_Research_on_the_Generation_of_Ozone_Using_Dielectric_Barrier_Discharge (дата обращения: 17.08.2024).
9. Guangming Huang. Dielectric barrier discharge for ozone generation. URL: <https://pureportal.strath.ac.uk/en/studentTheses/dielectric-barrier-discharges-for-ozone-generation-2> (дата обращения: 17.08.2024).
10. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications URL: https://www.researchgate.net/publication/225834883_Dielectric-Barrier_Discharges_Their_History_Discharge_Physics_and_Industrial_Applications (дата обращения: 17.08.2024).
11. Portugal S., Roy S., Lin J. Functional relationship between material property, applied frequency and ozone generation for surface dielectric barrier discharges in atmospheric air. URL: https://www.researchgate.net/publication/318682349_Functional_relationship_between_material_property_applied_frequency_and_ozone_generation_for_surface_dielectric_barrier_discharges_in_atmospheric_air (дата обращения: 17.08.2024).
12. Forte M.B.S., Jolibois J., Pons J., Moreau E., Touchard G., Gazalens M. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control. URL: https://www.researchgate.net/publication/226438066_Optimization_of_a_dielectric_barrier_discharge_actuator_by_stationary_and_non-stationary_measurements_of_the_induced_flow_velocity_Application_to_airflow_control (дата обращения: 17.08.2024).

13. Pons J., Moreau E., Touchard G. Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: Electrical properties and induced airflow characteristics. URL: https://www.researchgate.net/publication/231039274_Asymmetric_surface_dielectric_barrier_discharge_in_air_at_atmospheric_pressure_Electrical_properties_and_induced_airflow_characteristics (дата обращения: 17.08.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКСУДОВ Денис Вилевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. E-mail: maksudov.dv@ugatu.su

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Максудов Д.В. Оптимизация частоты питающего напряжения озонатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 42–50.

OPTIMIZATION OF OZONATOR SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY

D.V. Maksudov

Ufa State University of Science and Technology (Ufa)

Abstract. An original design of an ozonizer with a honeycomb structure is presented. An iterative algorithm was developed, as a result of its operation for a given ozonizer, graphs of the dependence of the critical frequency on the amplitude of the supply voltage, as well as on the temperature, composition and pressure of the gas mixture were obtained.

Keywords: honeycomb structure ozonizer, gas-discharge processes, critical frequency, iterative algorithm.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKSUDOV Denis Vilevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia. E-mail: maksudov.dv@ugatu.su

CITATION FOR AN ARTICLE

Maksudov D.V. Optimization of ozonator supply voltage frequency // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 42–50.

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**РАСЧЕТ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ
ПО ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ И СТЕН ВЫСОКОМОЩНЫХ
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.
ЧАСТЬ I. ТЕПЛООБМЕН ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ
В ВАННЕ МЕТАЛЛА**

*А.Н. Макаров**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2024

Аннотация. Отмечено, что в России, в Тверском государственном техническом университете, открыты законы теплового излучения электрических дуг дуговых сталеплавильных печей и факелов факельных нагревательных печей, топков паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок электростанций. На основе открытых законов разработана методика расчета тепловых потоков излучения дуг по поверхности ванны металла и шаровых сегментов под дугами в ванне, которая изложена в данной статье. В ходе расчетов установлено, что с ростом высоты слоя шлака происходит перераспределение потока теплового излучения дуг между поверхностями стен, свода, ванны (с одной стороны) и поверхностями шаровых сегментов в ванне под дугами (с другой). Сделан вывод, что шаровые сегменты образовались в ванне под действием электромагнитных сил дуг.

Ключевые слова: сталь, электрические дуги, теплообмен, тепловое излучение, ванна металла.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-51-62**ВВЕДЕНИЕ**

Электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). На долю дуг приходится 55–65 % энергии, поступающей в современную высокомоощную ДСП. От газокислородных горелок, инжекторов для вдувания углеродосодержащего порошка, экзотермических реакций, реакций окисления углерода, железа и других элементов шихты кислородом в ДСП приходит 35–45 % тепловой энергии. Вся подведенная к дугам электрическая энергия преобразуется в них в тепловую энергию, или тепловой поток. Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям, тепловой поток дуг ДСП на 92–96 % состоит из потока теплового излучения [1–6]; на долю теплопроводности, конвекции приходится 4–8 % мощности дуг.

В работе [7] аналитическим путем получено выражение для расчета КПД дуг ДСП всего номенклатурного ряда вместимостей от 0,5 до 200 т. В малотоннажных печах (ДСП-0,5–ДСП-6) дуги близко расположены к стенам, расстояние от дуг до стен составляет 0,31–0,69 м, в связи с чем в отсутствии слоя шлака КПД дуг равно 30–35 %. В большегрузных ДСП (ДСП-100–ДСП-200) расстояние от дуг до стен большое и составляет 2–3 м [8–14], а КПД дуг в отсутствии слоя шлака – 45–50 %. С ростом высоты слоя шлака и заглубления дуг КПД дуг повышается и достигает в большегрузных высокомоощных ДСП при полном погружении дуг в шлак 78–80 %. В книге [14] доказано, что с ростом высоты слоя шлака и КПД дуг удельный расход электроэнергии, потребляемой печью,

уменьшается. При увеличении высоты слоя шлака и КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии уменьшается на 0,75–1 %. Необходимо связать заглубление дуг в шлак, КПД дуг и удельный расход электроэнергии графической зависимостью для проведения анализов теплообмена и совершенствования энерготехнологических режимов плавок в ДСП.

В работе [14] изложены результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен высокоомощной 100-тонной ДСП (ДСП-100) при различной длине дуг и высоте слоя шлака. В ходе расчетов установлено, что с ростом заглубления дуг в шлак с 70 до 300 мм плотности потоков тепловых излучений дуг уменьшаются в среднем в 1,6 раза по всей высоте стен печи. С увеличением высоты слоя шлака доля теплового излучения дуг на стены и свод уменьшается в 1,6 раза, а на ванну металла и шлак – увеличивается в 1,6 раза, КПД дуг повышается также в 1,6 раза. Рассчитаем распределение плотностей потоков тепловых излучений электрических дуг по ванне металла и теплообмен дуг в ванне металла высокоомощной печи (ДСП-100) при различных высоте слоя шлака и длине дуг.

ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ

Согласно открытым в России, в Тверском государственном техническом университете (ТвГТУ), в 1996–2001 гг. законам теплового излучения газовых объемов [14] (электрические дуги в ДСП – это ионизированные излучающие газовые объемы), излучение цилиндрического газового объема может быть заменено излучением его цилиндрической оси симметрии. В книге [14] доказано, что, сосредоточив радиальным усилием все излучающие атомы, или всю излучаемую мощность электрической дуги, по цилиндрической оси симметрии последней, при расчетах теплообмена получим результат, аналогичный тому, который имеет место при рассредоточенном расположении излучающих атомов по всему объему электрической дуги. В соответствии с 1-м законом теплового излучения газовых объемов плотность потока теплового излучения q , падающего от цилиндрического газового объема, электрической дуги на расчетную площадку, прямо пропорциональна мощности дуги P_d , локальному угловому коэффициенту квантового излучения электрической дуги на расчетную площадку $\varphi_{дF}$ и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения газовой среды k , средней длине пути лучей от всех излучающих атомов дуги до расчетной площадки r и площади расчетной площадки F :

$$q = \frac{\varphi_{дF} P_d}{F e^{kr}}.$$

Согласно 2-му закону теплового излучения газовых объемов [14], средняя длина пути лучей от излучающих атомов газового объема (электрической дуги) до расчетной площадки равна среднearифметическому расстоянию от оси симметрии дуги до площадки. По 5-му закону теплового излучения газовых объемов, плотности потоков тепловых излучений цилиндрических газовых объемов большого диаметра и их цилиндрической оси симметрии на расчетную площадку равны при равенстве выделяющихся в них тепловых мощностей. Расчет угловых коэффициентов теплового излучения газовых объемов на расчетные площадки представляет собой сверхсложную задачу, так как для ее решения требуется трехкратное интегрирование геометрических и тригонометрических зависимостей [15–20]. В зональном и численном методах расчета теплообмена излучением

газовые объемы разбивают на 1–1,5 млн ячеек, представляющих собой прямоугольные параллелепипеды бесконечно малых размеров [15]. Угловые коэффициенты теплового излучения j -го параллелепипеда, заполненного излучающим газом, на площадку F находят с помощью трехкратного интегрирования по ширине a_j , глубине b_j , высоте h_j топки:

$$\varphi_{jF} = \int_{a_j} \int_{b_j} \int_{h_j} \frac{\cos \alpha_j \cos \beta_j}{2\pi r_j^2} d\alpha_j d\beta_j dr_j,$$

где α_j – угол между перпендикуляром к грани параллелепипеда и кратчайшей прямой r_j до расчетной площадки F ; β_j – угол между перпендикуляром к расчетной площадке F и прямой r_j .

Практические решения трехкратных интегралов для расчета угловых коэффициентов излучения газовых объемов на расчетные площадки отсутствуют как в России [16], так и за рубежом [18–20]. Сформулированные в РФ законы теплового излучения газовых объемов [14, 21] позволяют моделировать тепловое излучение газовых объемов любой формы и размеров вписанными в них цилиндрическими газовыми объемами, а в расчетах теплообмена – осями симметрии цилиндрических газовых объемов. Открытые законы теплового излучения газовых объемов позволили перейти в расчетах угловых коэффициентов излучения газовых объемов от тройного интеграла по ширине, глубине, высоте газового объема к однократному интегрированию по высоте цилиндрической оси симметрии газового объема и разработать в ТвГТУ методику расчета теплообмена в ДСП. В работах [5, 14] решены однократные интегралы и получены формулы для определения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов при любом пространственном положении их цилиндрических осей симметрии и расчетной площадки. Воспользуемся таблицами с формулами для нахождения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов на расчетные площадки с целью расчета теплообмена в ДСП-100 [14].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ НА ВАННУ МЕТАЛЛА

На рис. 1 (масштаб 1 : 30), 2 изображены необходимые построения для расчетов.

Условные обозначения на указанных рисунках: $h_{СТ}$ – высота стен ДСП-100, м; $d_Э$ – диаметр электродов, м; $h_З$, $h_М$, $h_Ш$ – высота заглубления дуги общая, в металл, в шлак соответственно, мм; $D_В$, $d_Р$ – диаметр ванны и распада электродов соответственно, мм; I – 13 – расчетные площадки на поверхности ванны металла; $l_Д$ – длина дуги, м; $l_{ОТК}$ – длина открытой части дуги, излучающей тепловой поток на расчетную площадку на поверхности ванны, м; r – луч, или расстояние от дуги до расчетной площадки на поверхности шлака, м; β – угол, под которым открытая часть дуги излучает на расчетную площадку, град; Θ – угол электродинамического отклонения дуги от оси электрода, град (определяется по методике, изложенной в работе [5]); O_1O_2 – ось симметрии электрода; O_3O_4 – ось симметрии печи; D_1D_2 – ось симметрии ванны металла; I – III – номера электродов фаз (А, В, С соответственно).

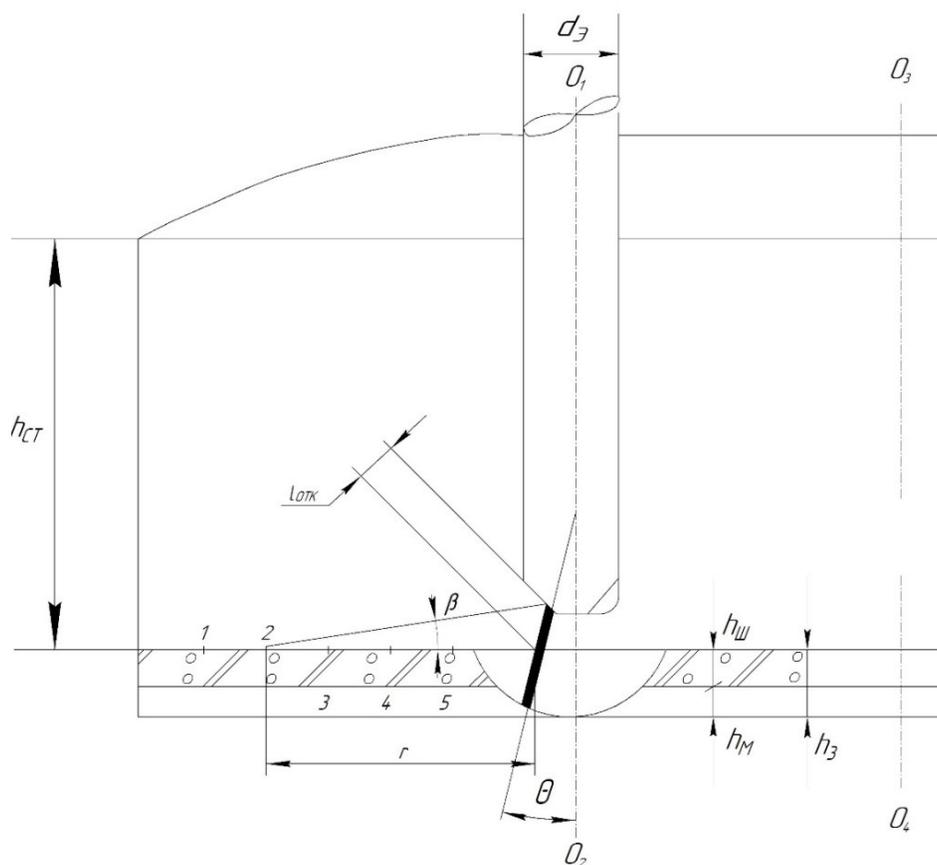


Рис. 1. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны металла

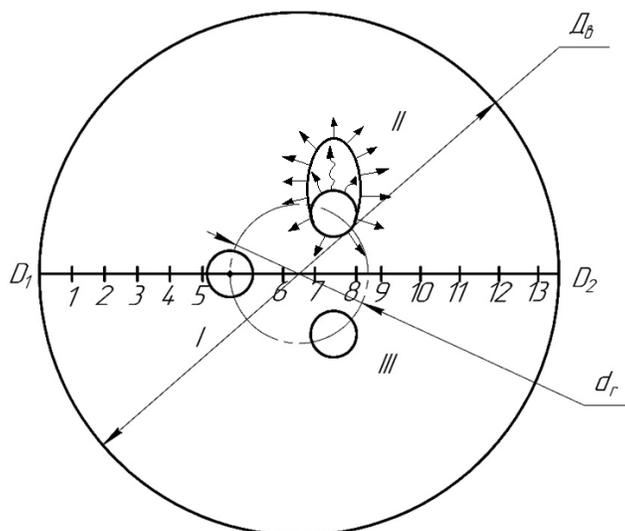


Рис. 2. Взаиморасположение электродов, ванны металла, стен (масштаб уменьшен (1 : 68))

Для взаимного расположения цилиндрической оси симметрии дуги и расчетной площадки, изображенных на рис. 1, 2, по таблице [5] находим аналитическое выражение для определения локальных угловых коэффициентов излучения электрической дуги на площадку 2:

$$\varphi_{ДФ} = \frac{\alpha_{СТ} l_{ОТК} \sin^2 \beta F}{2\pi^2 r l_{Д}^2}, \quad (1)$$

где $\alpha_{СТ}$ – доля мощности, выделяющаяся в столбе дуги, для ДСП-100 ($\alpha_{СТ} = 0,92$); F – прочность расчетной площадки, m^2 [14].

Подставив уравнение (1) в 1-й закон теплового излучения газовых объемов, получим аналитическое выражение для расчета плотностей потоков теплового излучения дуги на расчетные площадки 1–13, расположенные по поверхности ванны металла по оси симметрии ванны $D_1 D_2$ (см. рис. 1, 2):

$$q = \frac{\alpha_{СТ} P_{Д} l_{ОТК} \sin^2 \beta}{2\pi^2 r l_{Д}^2 e^{kr}}. \quad (2)$$

Для каждой расчетной площадки по выражению (2) определили плотности потоков тепловых излучений, падающих от дуг электродов I–III. Результаты расчетов суммировали, рассчитав для каждой из 13 расчетных площадок плотность потока теплового излучения, падающего на площадку от трех дуг фаз А, В, С. В расчетах по формуле (2) принимали к использованию средний коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи $k = 0,7$ (для поглощающей атмосферы), $k = 0$ (для лучепрозрачной атмосферы печи) [5].

Информация о диапазоне изменения линейного $U_{2л}$ и фазного $U_{2ф}$ напряжения, электропечного трансформатора при изменении ступеней напряжения, то есть о параметрах печи ДСП-100 и ее дуг, представлена ниже:

$D_B,$ м	$d_P,$ м	$h_{СТ},$ м	$d_Э,$ м	$U_{2л},$ В	$U_{2ф},$ В	$P_{Д},$ Вт	$U_{Д},$ В	$I_{Д},$ кА	$l_{Д},$ мм	$h_3,$ мм
5,4	1,4	2,5	600	829–300	479–173	18	360, 225	50, 80	425, 526	70, 160, 300, 425, 143, 256

По формуле (2) рассчитали плотности потоков тепловых излучений, падающих от 3 дуг на 13 расчетных площадок, пять из которых (1–5) расположены на поверхности ванны напротив электрода и дуги фазы I, а 8 площадок (6–13) – на поверхности ванны между электродами и дугами фаз II, III.

Под действием осевого электродинамического усилия дуга образует в ванне металла и шлаке мениск, или шаровой сегмент, высотой h_3 (см. рис. 1, 2). Для определения влияния высоты слоя шлака на распределение плотностей потоков тепловых излучений длинных дуг по поверхности ванны приняли четыре значения высоты слоя шлака и заглубления дуг в ванну металла и шлак (см. параметры выше): 1-е – $h_3 = 70$ мм; 2-е – $h_3 = 160$ мм; 3-е – $h_3 = 300$ мм; 4-е – $h_3 = 425$ мм. С целью выявления влияния длины дуг на теплообмен приняли в расчетах короткие и длинные дуги, равные соответственно 256 и 425 мм. Для коротких дуг взяли высоту слоя шлака и заглубления дуг в металл и шлак 143 и 256 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ

Рассмотрим результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений, падающих от трех дуг на участки поверхности ванны 1–5, расположенные напротив дуги фазы I, и на участки 6–13, находящиеся между дугами фаз II, III в поглощающей атмосфере печи. На рис. 3а представлены итоги расчета плотностей потоков тепловых излучений, падающих от трех дуг на участки поверхности ванны, расположенные около оси дуги фазы I, на рис. 3б – распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по диаметру ванны D_B . Для обеих частей рис. 3 $l_D = 425$ мм при $h_3 = 70$ мм (график 1), $h_3 = 160$ мм (2), $h_3 = 300$ мм (3), $h_3 = 425$ мм (4).

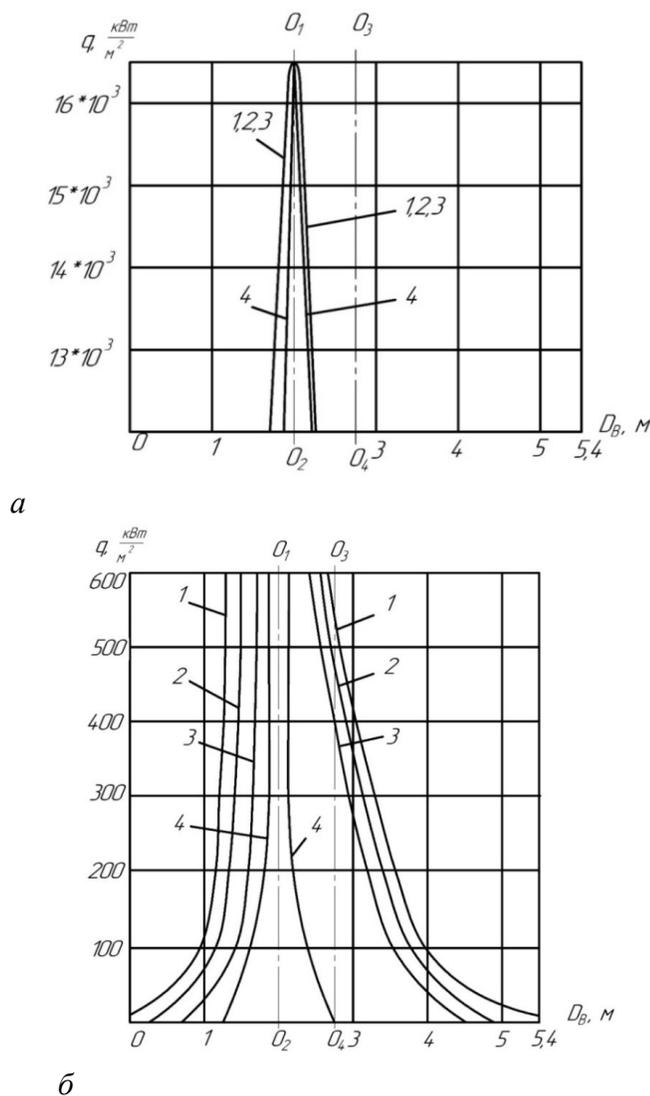


Рис. 3. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг:
а – по поверхности ванны в поглощательной атмосфере печи на расстоянии 0,5 м
от оси дуги O_1O_2 ; б – по диаметру ванны

Для участков ванны, расположенных на расстоянии 5 см от оси дуги фазы I , угол β стремится к 90° , $\sin\beta \approx 1$, $l_{\text{отк}}/l_{\text{д}} = 1$, $e^{k \cdot r} = 1$. Подставив эти данные в выражение (2), получим

$$q = \frac{\alpha_{\text{ст}} \cdot P_{\text{д}} \cdot l_{\text{отк}} \cdot \sin^2 \beta}{2\pi^2 \cdot r \cdot l_{\text{д}}^2 \cdot e^{k \cdot r}} = \frac{0,92 \cdot 18 \cdot 10^3 \cdot 0,425 \cdot 1}{2\pi^2 \cdot 0,05^2 \cdot 0,425^2 \cdot e^{0,7 \cdot 0,05}} = 16,56 \cdot 10^3 \text{ кВт/м}^2.$$

Таким образом, максимальные потоки теплового излучения дуг находятся на поверхности ванны в шаровом сегменте, образуемом электродинамическим давлением дуги на жидкометаллическую ванну, и составляют $16,56 \text{ МВт/м}^2$ при любой высоте шлака и любом заглублении дуги в жидкометаллическую ванну (см. рис. 3а). Такие мощные тепловые потоки, падающие от дуг на поверхности шарового сегмента, и среднemasсовая температура дуги 6000°C должны вызвать интенсивное испарение металла и шлака из зоны шарового сегмента. Однако это не так: в зоне дуг испаряется не более 10 % всего угара металла, а основная масса (90 %) – это угар металла в зонах продувки ванны кислородом [22]. Причины небольшой массы металла, испаряемого из зоны дуг, можно понять, проведя расчет и анализ теплообмена дуг и поверхностей ванны и шарового сегмента.

При высоте заглубления дуг в металл и шлак $h_3 = 70 \text{ мм}$ тепловые потоки от дуг составляют на участок ванны I , расположенный напротив дуги I около стены на откосах, 35 кВт/м^2 , на расстоянии 1 м от стены – 118 кВт/м^2 , 1,33 м – 528 кВт/м^2 , 1,66 м – 2794 кВт/м^2 , 2 м от стены под дугой – $16,56 \text{ мВт/м}^2$. С удалением расчетных площадок от дуги и оси O_1O_2 плотность тепловых потоков излучений дуг на ванну уменьшается и составляет по вертикальной оси печи и ванны металла O_3O_4 545 кВт/м^2 , на расстоянии 2 м от противоположной стены, от точки D_2 , – 275 кВт/м^2 , на расстоянии 1,66 м от указанной точки – 125 кВт/м^2 , на расстоянии 1,33 м от точки D_2 – 84 кВт/м^2 , на расстоянии 1 м от точки D_2 – 46 кВт/м^2 ; на откосах у точки D_2 – 6 кВт/м^2 . Таким образом, тепловые потоки, падающие от трех дуг на участки ванны, расположенные напротив дуги, превышают тепловые потоки, падающие на участки ванны, находящиеся между дугами, в следующее количество раз: на откосах – в 6 раз; на расстоянии 1 м от стен – в 2,6 раза; на расстоянии 1,33 м от стен – в 6,3 раза; на расстоянии 1,66 м от стен – в 22,4 раза; на расстоянии 2 м от стен – в 60 раз.

Вышеизложенные тепловые потоки излучения дуг падают на ванну после прорезки колодцев и горения дуг на ванну металла при отсутствии слоя шлака или его небольшой высоте на протяжении большей части времени расплавления шихты. Проведенные расчеты объясняют большую скорость расплавления шихты, расположенной напротив дуг, и замедленное расплавление шихты, находящейся на участках между дугами: тепловые потоки на участки, расположенные напротив дуг, в 6–60 раз превышают тепловые потоки на участки между дугами. Практика эксплуатации высокоомощных ДСП, процессов расплавления шихты в ДСП подтверждает результаты расчетов распределения тепловых потоков дуг по ванне. Расплавление шихты, находящейся на откосах между дугами, происходит с меньшей скоростью по сравнению со скоростью расплавления шихты, расположенной на откосах напротив дуг, так как расчетные и действительные тепловые потоки на откосах между дугами в 6 раз меньше по сравнению с расчетными и действительными тепловыми потоками на откосах напротив дуг. Итоги расчетов объясняют случаи наличия остатков нерасплавившегося лома, имеющегося на откосах между дугами по окончании расплавления шихты. Выравнивание тепловых потоков на периферии ванны осуществляют рациональным расположением газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов для вдувания углеродосодержащего порошка на

водоохлаждаемых панелях стен между электродами и напротив зон с пониженной температурой ванны металла [23–27].

По мере расплавления высота шихты в рабочем пространстве печи уменьшается, водоохлаждаемые панели стен освобождаются от шихты, закрывающей панели от прямого теплового излучения дуг. Для защиты указанных панелей от прямого теплового излучения дуг и с целью повышения КПД дуг высоту слоя шлака увеличивают [7, 9]. На рис. 3б графики 2, 3 характеризуют распределение потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны при высоте заглибления дуг $h_3 = 160$ мм и $h_3 = 300$ мм соответственно. Как видно из рис. 3б, с повышением высоты слоя шлака дуги погружаются в него и их тепловое излучение не достигает откосов. Напротив дуги на расстоянии 1 м от стен тепловые потоки на ванну составляют 56 и 14 кВт/м² при высоте слоя шлака 160 и 300 мм соответственно. Еще меньше тепловые потоки на ванну между дугами на расстоянии 1 м от точки D_2 : они составляют 17 и 3 кВт/м² при высоте шлака 160 и 300 мм соответственно. По мере приближения к дуге тепловые потоки на ванну металла возрастают. Однако неравномерность теплового излучения дуг на ванну с увеличением высоты слоя шлака сохраняется: тепловые потоки, падающие на участки ванны, расположенные напротив дуг, в 6–60 раз превышают тепловые потоки на участки ванны, находящиеся между дугами, о чем мы говорили также выше.

В ходе проведенных расчетов установлено, что с ростом заглибления дуг в шлак печи ДСП-100 с 70 до 300 мм плотность потоков тепловых излучений дуг уменьшается в среднем в 1,6 раза по всей высоте стен [7, 14]. С повышением высоты слоя шлака доля теплового излучения дуг на стены и свод снижается в 1,6 раза, а на ванну увеличивается в 1,6 раза [7, 14]. При погружении электрических дуг в шлак и ванну металла происходит перераспределение теплового излучения дуг между поверхностью ванны и поверхностью шарового сегмента, образуемого дугой в ванне металла и шлаке (см. рис. 1). С увеличением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на поверхность ванны уменьшается, а на поверхность шарового сегмента в ванне металла и шлаке возрастает.

На рис. 3б (график 4) приведены результаты расчета распределения тепловых потоков излучения дуг по поверхности ванны при полном погружении дуг в шлак ($h_3 = 425$ мм). Как видно из результатов расчетов, при полном погружении дуг в шлак и ванну металла на поверхность ванны дуги практически не излучают тепловые потоки. Тепловой поток излучения дуг сосредоточен на поверхности шарового сегмента в ванне металла и шлаке, среднemasсовая температура дуги 6000 °С [1–6]. Температура поверхности части шарового сегмента высотой h_m , образуемого электродинамическим давлением дуги на жидкометаллическую ванну, не превышает температуру кипения железа $t_m = 2735$ °С.

Температура поверхности шлака высотой $h_{ш}$ в шаровом сегменте не превышает температуру испарения шлака $t_{ш} = 2500$ °С [28, 29]. Тепло к ванне расплавляемого металла передается теплопроводностью и конвекцией от горячей поверхности шарового сегмента в жидкометаллической ванне и шлаке. На рис. 2 процесс преобразования тепловых потоков излучения дуг в потоки конвективные (волнистые линии) и теплопроводности (прямые линии – стрелки) в шаровых сегментах показан на примере дуги фазы II. Аналогичные процессы преобразования потоков теплового излучения дуг в потоки конвективные и теплопроводности происходят и под дугами фаз I и III. При постоянной величине тока с ростом высоты слоя шлака увеличивается доля теплового потока излучения, получаемого шлаком от дуг и передаваемого шлаком ванне расплавляемого металла теплопроводностью и конвекцией. Перегретый шлак из шарового сегмента передает тепло как ванне металла, так

и соседним слоям шлака. Ванна металла получает тепло от горячих шаровых сегментов, находящихся под электродами, путем теплопроводности и вынужденной конвекции, возникающей под влиянием электродинамических сил электрических дуг. Дуга под действием отклоняющей электродинамической силы перемещается в шаровом сегменте с частотой 50 Гц от оси электрода O_1O_2 до поверхности шлака, далеко выбрасывает металл и шлак и образует шаровой сегмент в ванне металла [1, 5]. Механизм образования шарового сегмента подробно описан в учебнике [5]. Согласно закону Архимеда, под действием гидростатической подъемной силы новые слои металла и шлака взамен выброшенных дугой поступают в шаровой сегмент (см. рис. 1) и процессы перемешивания, выбрасывания металла, шлака из сегмента повторяются, создавая постоянно действующий мощный перемешивающий эффект металла, шлака, конвективный теплообмен в ванне интенсифицируется. При увеличении высоты слоя шлака все большее количество шлака участвует в конвективном теплообмене и конвективный теплообмен ванны и шарового сегмента интенсифицируется, возрастает перенос тепла из шарового сегмента к соседним слоям шлака и ванны металла, КПД дуг повышается.

Таким образом, электрические дуги излучают тепло на свод, стены, ванну металла, на поверхность шарового сегмента в ванне металла и шлаке. С повышением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на свод, стены, ванну металла снижается и увеличивается тепловое излучение дуг на поверхность шарового сегмента в ванне металла, шлаке, КПД дуг возрастает. При увеличении слоя шлака возрастает количество шлака, участвующего в конвективном теплообмене за счет электродинамических сил дуг, усиливается конвективный теплообмен шарового сегмента с ванной металла, шлаком, что приводит к повышению КПД дуг. Тепло, полученное шаровым сегментом тепловым излучением от дуг, из сегмента путем теплопроводности и интенсивной конвекции передается ванне металла, шлаку. При полном погружении дуг в ванну металла и шлак $h_3 = l_d$ и большая часть теплового излучения дуг попадает на поверхность шаровых сегментов, увеличивая КПД дуг до 80 % [14]. Небольшая часть теплового излучения дуг (не более 20 %) выходит из шаровых сегментов, в которых находятся дуги, попадая на поверхность стен, свода [14]. Вследствие интенсивного конвективного теплообмена шлака, металла, постоянной заменяемости перегретых слоев шлака, металла менее нагретыми слоями в шаровом сегменте с частотой 50 раз в секунду только малая часть выделенного в шаровом сегменте дугами тепла расходуется на испарение металла и шлака. Результаты вышеизложенных аналитических исследований подтверждаются практикой эксплуатации высокоомощных ДСП: угар металла под дугами составляет 8,6 %, основная доля (91,4 %) угара металла приходится на потери Fe с шлаком и испарение металла в зоне продувки металла кислородом [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе расчетов было установлено, что тепловые потоки излучения дуг распределены по ванне металла печи ДСП-100 довольно неравномерно. Тепловые потоки, падающие на участки ванны напротив дуги, превышают тепловые потоки, падающие на участки ванны, находящиеся между дугами на откосах и на расстоянии 1,33 м от стен, в 6 раз, на расстоянии 1,66 м от стен – в 22,4 раза, на расстоянии 2 м от стен – в 60 раз. Полученные результаты объясняют большую скорость расплавления шихты, расположенной напротив дуг, и меньшую скорость расплавления шихты на участках, расположенных между дугами. Итоги выполненных расчетов могут быть использованы для рационального расположения газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов для

вдувания углеродосодержащего порошка в стенах между электродами и напротив зон с пониженной температурой ванны металла.

В ходе расчетов также было выявлено, что с ростом заглубления дуг в шлак происходит перераспределение теплового излучения дуг между поверхностями стен, свода, ванной (с одной стороны) и поверхностями шаровых сегментов, образованных электродинамическими силами дуг в ванне металла и шлаке (с другой). С увеличением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на поверхность стен, свода, ванну уменьшается, а на поверхности шаровых сегментов увеличивается. За счет электродинамических сил дуги углубляются в ванну и шлак, выбрасывают с частотой 50 раз в секунду жидкий металл и шлак из шаровых сегментов, создавая благоприятные условия для преобразования тепловых потоков излучения дуг в потоки конвективные и теплопроводности. Электромагнитное выдувание дуг способствует перемешиванию металла, шлака и интенсификации конвективного теплообмена, возрастанию КПД дуг [21–29]. При полном погружении дуг в шлак количество шлака, участвующего в конвективном теплообмене, увеличивается и КПД дуг достигает максимального значения 78–80 %. Вследствие интенсивного конвективного теплообмена шлака, металла в шаровом сегменте только малая часть выделяемого дугами в указанном сегменте тепла расходуется на испарение металла и шлака, подавляющая часть тепла дуг тратится на расплавление шихты и нагрев ванны металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / под ред. Л.Е. Никольского. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
2. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи: учебное пособие. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
3. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии: учебник для вузов по специальности «Металлургия черных металлов». М.: Металлургия, 1985. 280 с.
4. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // *Электromеталлургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. Макаров А.Н., Кузнецов А.В., Рыбакова В.В., Галичева М.К. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах // *Промышленная энергетика*. 2014. № 10. С. 10–15.
7. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 325 с.
8. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Ашпин Н.А. Прямое получение стали из рудного сырья: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 428 с.
9. Кузнецов М.С., Якушев Е.В., Кулагин С.А., Котельников Т.И., Семин А.Е., Косырев К.Л., Кулиш Р.С. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи // *Электromеталлургия*. 2010. № 2. С. 2–6.
10. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д. Существует ли реальная альтернатива лому в электросталеплавильном производстве? // *Электromеталлургия*. 2008. № 5. С. 27–30.
11. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д., Шумаков А.М. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах // *Вестник ЮУрГУ*. 2008. № 9. С. 10–13.

12. Борн К., Грандерат Р. Потенциальные возможности и проблемы утилизации тепла в сталеплавильных цехах // *Металлургическое производство и технология*. 2013. № 2. С. 8–19.
13. Макаров А.Н. Изменение КПД дуг в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах // *Металлург*. 2017. № 4. С. 55–58.
14. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.
15. Теплотехнические расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей: справочник / под ред. А.Б. Усачева. М.: Черметинформация, 1999. 184 с.
16. Блох А.Г., Журавлев А.Ю., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
17. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
18. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / под ред. д-ра техн. наук Б.А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 934 с.
19. Спэроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением / пер. с англ. С.З. Сориц, Л.М. Сорокопуда; под ред. А.Г. Блоха. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1971. 294 с.
20. Чандрасскар С. Перенос лучистой энергии / под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Издательство иностранной литературы, 1993. 432 с.
21. Макаров А.Н. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Волга: Инфра-Инженерия, 2023. 276 с.
22. Кожухов А.А., Федина В.В., Меркер Э.Э. Исследование процесса вспенивания сталеплавильного шлака и его влияния на тепловую работу дуговой сталеплавильной печи // *Металлург*. 2012. № 3. С. 42–44.
23. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 10. С. 13–15.
24. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавки в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 9. С. 30–36.
25. Кузьменко А.Г., Фролов Ю.Ф., Поздняков М.А., Лебедев В.А., Саутин С.Д. Перспективы развития электросталеплавильного комплекса – электропечей и ковшовых печей для производства стали // *Электрометаллургия*. 2012. № 11. С. 2–11.
26. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть I. Расчет и анализ взаимосвязи КПД дуг и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 4. С. 29–35.
27. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть II. Расчет и анализ взаимосвязи расположения дуг, стен и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 5. С. 21–27.
28. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 320 с.
29. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2015. Т. 15. № 3. С. 70–79.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Расчет потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны и стен высокоомощных электродуговых сталеплавильных печей. Часть I. Теплообмен электрических дуг в ванне металла // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 51–62.

CALCULATION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF ARC ON THE SURFACE OF THE BATH AND WALLS OF HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEEL-MELTING FURNACES. PART I. HEAT TRANSFER OF ELECTRIC ARC IN A METAL BATH

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that in Russia, at Tver State Technical University, the laws of thermal radiation of electric arcs of arc steelmaking furnaces and torches of flare heating furnaces, furnaces of steam boilers, combustion chambers of gas turbine installations of power plants have been discovered. Based on open laws, a method has been developed for calculating the thermal fluxes of arc radiation along the surface of a metal bath and ball segments under arcs in the bath, which is described in this article. In the course of calculations it was established that with the growth of the slag layer height there is a redistribution of the thermal radiation flux of the arcs between the surfaces of walls, vault, bath (on the one hand) and surfaces of ball segments in the bath under the arcs (on the other hand). It is concluded that the spherical segments were formed in the bath under the action of the electromagnetic forces of the arcs.

Keywords: steel, electric arcs, heat exchange, thermal radiation, metal bath.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Calculation of thermal radiation fluxes of arc on the surface of the bath and walls of high-power electric arc steel-melting furnaces. Part I. Heat transfer of electric arc in a metal bath // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (22), pp. 51–62.

УДК 629.7.052

ЗАМЕТКА ОБ n -СИММЕТРИИ ЛИНЕЙНОГО СТЕРЖНЯ*Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин²*¹ *Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*² *Мытищинский филиал Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана
(г. Мытищи, Московская область)*

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., 2024

Аннотация. В предыдущих работах авторов понятие момента n -го порядка изучалось для случая размерности 3 (пространственного тела) и случая размерности 2 (плоской пластины). В данной работе это понятие рассмотрено для случая размерности 1 (линейного стержня). Установлено, что момент n -го порядка стержня относительно точки t достигает своего наименьшего значения тогда, когда эта точка t является центром $(n-1)$ -симметрии этого стержня.

Ключевые слова: симметрия, n -симметрия, центр симметрии, момент инерции, момент n -го порядка, линейный стержень, функция плотности, масса, центр масс, электрическая машина, метод, объемная деталь, плоская деталь, теорема, лемма, пластина, размерность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-63-71**ВВЕДЕНИЕ**

Имеется длинный список работ [14–31], в которых изучены вопросы симметрии в распределении массы внутри пространственных тел или внутри плоских пластин. Исследования такого рода могут помочь при выборе технологий и методов обработки деталей машин. О многообразии современных методов и технологий механической и физико-технической обработки деталей машин дают представление труды [1–13]. Выбор из этого многообразия тех конкретных методов и технологий, которые должны быть оптимальны, особенно важен при изготовлении и балансировке вращающихся деталей электрических машин.

Источники [21–24, 28, 29, 31] посвящены изучению симметрии объемных деталей. В этих работах рассматриваются вопросы симметрии для случая размерности 3. В центре внимания работ [14–20, 25–27, 30] находится симметрия плоских деталей, следовательно, проанализированы вопросы симметрии для случая размерности 2. В настоящей статье изучается симметрия линейных деталей, то есть решаются вопросы симметрии для случая размерности 1. В этом простом случае удастся доказать значимую теорему, которая не вполне ожидаемым образом связывает между собой понятие момента n -го порядка и понятие центра n -симметрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Предметом изучения является линейный стержень.

Линейным стержнем называется отрезок вместе с определенной на этом отрезке *функцией плотности*. Он представляет собой упрощенную модель физического стержня

(который может рассматриваться как линейная деталь). Поскольку далее будут встречаться только линейные стержни, само прилагательное «линейный» в его названии может отсутствовать.

Пусть имеется линейный стержень D , представляющий собой отрезок $[a; b]$ на оси OX вместе с определенной на этом отрезке функцией плотности $f(x)$. Указанная функция считается непрерывной и неотрицательной (допускается обращение этой функции в ноль, но предполагается, что $\int_c^d f(x)dx > 0$ для любых c и d , удовлетворяющих условию $a \leq c < d \leq b$).

Пусть на оси OX выбрана произвольная точка $x = t$, тогда *моментом n -го порядка стержня D относительно точки t* называется

$$M_n(D) = \int_a^b |t - x|^n f(x) dx.$$

Момент нулевого порядка стержня D не зависит от точки t и выражает собой *массу* стержня D : $M_0(D) = \int_a^b |t - x|^0 f(x) dx = \int_a^b f(x) dx = m(D)$.

Момент первого порядка стержня D относительно точки t представляет собой *статический момент* стержня D относительно точки t : $M_1(D) = \int_a^b |t - x| f(x) dx$.

Момент второго порядка стержня D относительно точки t представляет собой *момент инерции* стержня D относительно точки t : $M_2(D) = \int_a^b (t - x)^2 f(x) dx$.

Если $t \in [a; b]$, то точка t делит отрезок $[a; b]$ на два отрезка ($[a; t]$ и $[t; b]$) и в соответствии с этим точка t делит стержень D на два стержня – D_1 и D_2 (функцией плотности для каждого из них является та же функция $f(x)$, область определения которой ограничена соответствующим отрезком). Точка t стержня D называется *центром n -симметрии* стержня D , если $M_n(D_1) = M_n(D_2)$.

Центр 0-симметрии стержня D представляет собой точку, которая делит этот стержень на два с равными массами, и, таким образом, центр 0-симметрии представляет собой *центр полумасс* (в соответствии с терминологией, принятой в источниках [16] и [23]). Центр 1-симметрии стержня D – это точка, которая делит этот стержень на два с равными статическими моментами, и, таким образом, центр 1-симметрии выступает *центром масс* стержня D .

Рассмотрим вспомогательную лемму.

Лемма. Если $n > 0$, то:

$$a) \left(\int_a^t (t - x)^n f(x) dx \right)' = n \int_a^t (t - x)^{n-1} f(x) dx;$$

$$б) \left(\int_b^t (x-t)^n f(x) dx \right)' = -n \int_b^t (t-x)^{n-1} f(x) dx .$$

Доказательство леммы

Если $\lambda(u(t), v(t)) = \int_a^{u(t)} \varphi(x, v(t)) dx$, то дифференцирование по переменной t сложной функции $\lambda(t)$ будет выглядеть так:

$$\lambda'(t) = \frac{\partial \lambda}{\partial u} u'(t) + \frac{\partial \lambda}{\partial v} v'(t) = \varphi(u(t), v(t)) u'(t) + \int_a^{u(t)} \varphi'_v(x, v(t)) dx \cdot v'(t) .$$

Подставив в это соотношение $u(t) = t$ и $v(t) = t$, получим

$$\left(\int_a^t \varphi(x, t) dx \right)' = \varphi(t, t) + \int_a^t \varphi'_t(x, t) dx .$$

Теперь, приняв $\varphi(x, t) = (t-x)^n f(x)$, получаем утверждение *a* леммы:

$$\left(\int_a^t (t-x)^n f(x) dx \right)' = (t-t)^n f(t) + \int_a^t n(t-x)^{n-1} f(x) dx = n \int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx ,$$

а приняв $\varphi(x, t) = (x-t)^n f(x)$, – утверждение *б* леммы:

$$\left(\int_a^t (x-t)^n f(x) dx \right)' = (t-t)^n f(t) - \int_a^t n(x-t)^{n-1} f(x) dx = -n \int_a^t (x-t)^{n-1} f(x) dx .$$

Как известно [16, 23], для плоской пластины и пространственного тела центр n -симметрии может и не существовать. Как показывает теорема, данная ниже, в случае с линейным стержнем все проще и удобнее.

Теорема 1. Центр n -симметрии стержня D существует и единственен для всякого $n \geq 0$.

Доказательство теоремы 1

Пусть имеется стержень D с отрезком $[a; b]$ и функцией плотности $f(x)$ и пусть точка $t \in [a; b]$ делит стержень D на два (D_1 и D_2). Рассмотрим функцию $\gamma(t)$, определенную на отрезке $[a; b]$ следующим образом:

$$\gamma(t) = \int_a^t (t-x)^n f(x) dx - \int_t^b (x-t)^n f(x) dx .$$

Ее значения на концах отрезка $[a; b]$ имеют разные знаки:

$$\gamma(a) = \int_a^a (a-x)^n f(x) dx - \int_a^b (x-a)^n f(x) dx = - \int_a^b (x-a)^n f(x) dx < 0;$$

$$\gamma(b) = \int_a^b (b-x)^n f(x) dx - \int_b^b (x-b)^n f(x) dx = \int_a^b (b-x)^n f(x) dx > 0.$$

В то же время эта функция монотонно возрастает на отрезке $[a; b]$. Для $n > 0$ это следует из того, что ее производная (которую легко вычислить при помощи рассмотренной леммы) положительна:

$$\gamma'(t) = n \int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx + n \int_t^b (x-t)^{n-1} f(x) dx > 0.$$

При $n = 0$ производная $\gamma'(t)$ находится следующим образом:

$$\gamma'(t) = \left(\int_a^t f(x) dx + \int_b^t f(x) dx \right)' = f(t) + f(t) = 2f(t).$$

Поскольку функция $f(t)$ неотрицательна на отрезке $[a; b]$ и притом $\int_c^d f(x) dx > 0$

для любых c и d , удовлетворяющих условию $a \leq c < d \leq b$, то этими же свойствами обладает и производная $\gamma'(t)$. Поэтому (так же, как и при $n > 0$) функция $\gamma(t)$ строго возрастает.

Итак, функция $\gamma(t)$ строго возрастает и имеет на концах отрезка $[a; b]$ разные знаки. Следовательно, существует единственная точка $t \in [a; b]$, для которой $\gamma(t) = 0$, то есть

$$\int_a^t (t-x)^n f(x) dx = \int_t^b (x-t)^n f(x) dx.$$

Поскольку это равенство означает $M_n(D_1) = M_n(D_2)$, то есть именно то, что точка t является центром n -симметрии стержня D , то теорема доказана.

Пусть зафиксирован стержень D с отрезком $[a; b]$ и функцией плотности $f(x)$. Тогда момент n -го порядка $M_n(D)$ стержня D относительно точки t является функцией, зависящей от точки t : $M_n(D) = M_n(t)$. Естественно, возникает вопрос о том, при каком значении t эта функция достигает своего наименьшего значения. Ответ на него дает теорема 2.

Теорема 2. *Функция $M_n(t)$ при $n \geq 1$ достигает своего наименьшего значения в той точке, которая является центром $(n-1)$ -симметрии стержня D .*

Доказательство теоремы 2

Функция $M_n(t)$ определена на всей числовой оси, но ее значения для аргумента t , лежащего за пределами отрезка $[a; b]$, всегда больше, чем ее значение для любого $t \in [a; b]$. Поэтому наименьшее значение этой функции может достигаться только при $t \in [a; b]$. Пусть $t \in [a; b]$. Тогда точка t делит стержень D на два (D_1 и D_2) и функция $M_n(t)$ имеет

$$\text{вид } M_n(t) = \int_a^b |t-x|^n f(x) dx = \int_a^t (t-x)^n f(x) dx + \int_t^b (x-t)^n f(x) dx.$$

В силу рассмотренной леммы производная функции $M_n(t)$ может быть вычислена следующим образом:

$$\begin{aligned} M_n'(t) &= \left(\int_a^t (t-x)^n f(x) dx - \int_t^b (x-t)^n f(x) dx \right)' = \\ &= n \int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx + n \int_t^b (x-t)^{n-1} f(x) dx = \\ &= n \int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx - n \int_t^b (x-t)^{n-1} f(x) dx. \end{aligned}$$

Значения этой производной на концах отрезка $[a; b]$ имеют разные знаки:

$$\begin{aligned} M_n'(a) &= n \int_a^a (a-x)^{n-1} f(x) dx - n \int_a^b (x-a)^{n-1} f(x) dx = -n \int_a^b (x-a)^{n-1} f(x) dx < 0; \\ M_n'(b) &= n \int_a^b (b-x)^{n-1} f(x) dx - n \int_b^b (x-b)^{n-1} f(x) dx = n \int_a^b (b-x)^{n-1} f(x) dx > 0. \end{aligned}$$

Вторая производная функции $M_n(t)$ может быть вычислена при помощи той же леммы (при условии, что порядок n больше единицы) так:

$$\begin{aligned} M_n''(t) &= \left(n \int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx + n \int_t^b (x-t)^{n-1} f(x) dx \right)' = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} f(x) dx - n(n-1) \int_t^b (x-t)^{n-2} f(x) dx = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} f(x) dx + n(n-1) \int_t^b (x-t)^{n-2} f(x) dx. \end{aligned}$$

В полученном выражении оба слагаемых положительны при любом $t \in [a; b]$ и всяком $n > 1$, а следовательно, $M_n''(t) > 0$ на отрезке $[a; b]$. Это значит, что производная $M_n'(t)$ строго возрастает и обращается в ноль в единственной точке отрезка $[a; b]$. В этой

точке достигается минимум функции $M_n(t)$, а значит, и ее наименьшее значение. Приравняв к нулю полученное ранее выражение для производной $M_n'(t)$, получаем

$$\int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx = \int_t^b (x-t)^{n-1} f(x) dx,$$

но это равенство и означает, что моменты $M_{n-1}(D_1)$ и $M_{n-1}(D_2)$ относительно точки t равны, то есть точка t представляет собой центр $(n-1)$ -симметрии стержня D.

За пределы приведенного рассуждения выпадает случай $n=1$, но и для него утверждение теоремы справедливо. Поскольку $M_1'(t) = \int_a^t f(x) dx - \int_t^b f(x) dx$, то

$$M_1''(t) = \left(\int_a^t f(x) dx + \int_t^b f(x) dx \right)' = f(t) + f(t) = 2f(t).$$

Функция $f(t)$ неотрицательна на отрезке $[a; b]$ и притом $\int_c^d f(x) dx > 0$ для любых c и d , удовлетворяющих условию $a \leq c < d \leq b$. Очевидно, этими же свойствами должна обладать и вторая производная – $M_1''(t)$. Отсюда следует, что первая производная ($M_1'(t)$) строго возрастает и обращается в ноль в единственной точке, а именно в той, для которой $\int_a^t f(x) dx = \int_t^b f(x) dx$. Эта точка является центром 0-симметрии стержня D, то есть его центром полумасс. В ней и достигается наименьшее значение момента первого порядка $M_1(t)$. Отметим, что наименьшее значение момента второго порядка $M_2(t)$, то есть момента инерции, достигается в центре 1-симметрии стержня D (в его центре масс).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Понятие n -симметрии рассмотрено для линейного случая, который является более простым, чем случай плоскости или пространства. Для этого простого случая сформулированы две содержательные теоремы, причем теорема 2 устанавливает несколько неожиданный критерий достижения моментом n -го порядка $M_n(D)$ своего минимума. Можно предположить, что эта теорема, относящаяся к случаю размерности 1, в том или ином виде может быть перенесена на более сложные случаи размерности (2 и 3), которым посвящены работы [14–31].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие: в 2 т. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1. 247 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 266 с.
5. Немилев Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов: учебное пособие. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и пресс-форм: методические рекомендации по проектированию. М.: ОНТИ ЭНИМС, 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз, 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание, 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 25. С. 3–8.
15. Шум Ал.А. Замечание об s -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 27. С. 3–6.
16. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.
17. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 31. С. 19–22.
18. Шум Ал.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 32. С. 103–105.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 47–53.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 44–47.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Об одном критерии s -симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 30–35.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 1 (5). С. 71–78.

24. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 57–65.
25. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о центрах s -симметрии и c -симметрии плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 63–70.
26. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Моменты плоской пластины относительно прямой и некоторые вопросы симметрии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 78–84.
27. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 65–72.
28. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О понятии n -симметрии пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 66–72.
29. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. О центрах симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 64–72.
30. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре n -симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 75–82.
31. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре n -симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 76–82.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУМ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: shum@tstu.tver.ru

ВЕТОШКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 141005, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Заметка об n -симметрии линейного стержня // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 63–71.

**A NOTE ON THE n -SYMMETRY
OF A LINEAR ROD***Al.A. Shum¹, A.M. Vetoshkin²*¹ *Tver State Technical University (Tver)*² *Mytishchi filial of MSTU named after N.E. Bauman
(Mytishchi city, Moscow region)*

Abstract. In previous works of the authors, the concept of an n th-order moment was studied for the case of dimension 3 (a spatial body) and the case of dimension 2 (a flat plate). In this paper, this concept is considered for the case of dimension 1 (linear rod). It is established that the moment of the n th order of the rod relative to a point reaches its lowest value when this point is the center of the $(n-1)$ symmetry of this rod.

Keywords: symmetry, n -symmetry, center of symmetry, moment of inertia, moment of n -th order, linear rod, density function, mass, center of mass, electric machine, method, volumetric detail, flat detail, theorem, lemma, plate, dimension.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SHUM Alexander Anatolievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shum@tstu.tver.ru

VETOSHKIN Alexander Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, MF Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 1, 1st Institutskaya street, Mytishchi city, Moscow region, 141005, Russia. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M. A note on the n -symmetry of a linear rod // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. № 2 (22), pp. 63–71.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 532.135

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДООБРАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, С ПОМОЩЬЮ КОНУСНОЙ ПЕНЕТРАЦИИ. ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

*В.В. Белов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2024

Аннотация. Отмечено, что для определения реологических характеристик структурированных дисперсных систем большими преимуществами обладает пенетрометрия, основанная на погружении в исследуемую среду конического индентора. Указано, что главной проблемой в использовании конических пластометров выступает достоверность полученных результатов. Продемонстрировано, что большинство уплотненных трехфазных систем являются твердообразными и что периоды восстановления разрушенных связей у них сокращаются. Для таких систем разработан и рассмотрен метод определения реологических характеристик с помощью пенетрационного реометра на основе модельных представлений о картине деформирования среды в зоне внедрения конуса с постоянной скоростью. Сделан вывод, что применение описанной методики позволяет измерять как предельное напряжение сдвига, так и вязкость структурированных дисперсных систем.

Ключевые слова: реологические характеристики, пенетрометрия, структурированные дисперсные системы, предельное напряжение, сдвиг, вязкость, метод конусной пенетрации, деформирование среды, конус.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-72-82

С реологической точки зрения структурированные дисперсные системы, к которым относится большинство сырьевых смесей строительных материалов, подразделяют на жидкообразные и твердообразные упруговязкопластичные. Полное реологическое описание дисперсных систем включает несколько реологических характеристик, соответствующих различным степеням разрушения структуры: предельное напряжение сдвига, предел текучести, вязкость, модуль упругости и т. д. К настоящему времени разработано множество приборов и способов для определения реологических характеристик структурированных дисперсных систем. Наиболее часто применяют метод сдвига ребристой пластинки Вейлера – Ребиндера [1], в дальнейшем усовершенствованный [2]. Кроме того, используется метод вращающихся коаксиальных цилиндров, предложенный Ф.Н. Шведовым, впоследствии детально разработанный

Н.П. Воларовичем [3]. Данный метод также развивается и в настоящее время, в том числе с учетом температурной зависимости [4]. Приборы создают в системе практически однородное поле напряжений, однако они неприменимы для исследования твердообразных систем, частицы которых связаны между собой значительно большими (по сравнению с жидкообразными системами) силами аутогезии различной природы [5–7]. Среди этих сил следует особо выделить силы сцепления, обусловленные поверхностным натяжением жидкости и капиллярным давлением [8, 9]. Для твердообразных систем практически единственным способом определения их реологических свойств является метод конусной пенетрометрии.

Сведения об изучении механических свойств дисперсных систем путем измерения глубины погружения конусного индентора под действием известной силы появились в литературе более 50 лет назад и относились к испытаниям глинистых грунтов ненарушенной структуры, проведенным Шведской геотехнической комиссией [10]. В трудах по механике грунтов рассматриваемый метод был назван методом пенетрации и затем стал широко использоваться [10].

Конические пластометры для исследования дисперсных систем в различных областях технологии стали активно применяться после публикации работы П.А. Ребиндера и Н.А. Семененко [11].

Ключевым вопросом при использовании рассматриваемого метода был и остается вопрос о воспроизводимости и инвариантности итоговых данных. До настоящего времени нет, несмотря на более чем тридцатилетнюю практику применения вышеназванных пластометров, единого мнения о степени инвариантности результатов измерений. В работе [10] приводятся взятые из многих источников данные по пенетрации грунтов, которые свидетельствуют, что при различных глубинах погружения конуса, если эти глубины более 10–15 мм, данные по удельному сопротивлению пенетрации (пропорциональному пластической прочности) инвариантны. П.А. Ребиндер и Н.А. Семененко в источнике [11] также говорят о наличии инвариантности. В то же время в статьях [12, 13] пишут об отсутствии инвариантности данных по пластической прочности, полученных при различных глубинах погружения конуса, причем нарушение инвариантности тем больше, чем меньше глубина погружения. Кроме того, указывают, что для систем с малой пластической прочностью нарушения инвариантности наблюдаются и при постоянных глубинах погружения в зависимости от величины угла при вершине конуса (чем этот угол ближе к 90° , тем больше нарушение).

В многочисленных работах (например, [14]) технологи, использующие конические пластометры, на инвариантность конечных данных не обращают внимание.

Еще в 1948 г. П.А. Ребиндер и Б.Я. Ямпольский в работе [13] писали о нежелательности имеющегося ускорения в движении индентора в пластометрах с падающим конусом. В дальнейшем влияние этого фактора на измерения не учитывалось. Прямое определение величины сил инерции, связанных с переменной скоростью погружения падающего конуса в исследуемую среду [15], показало, что эти силы могут достигать половины величины тех сил, под действием которых рассчитывается внедрение конуса по существующей методике. Величина сил инерции зависит также от того, с какой скоростью производится снятие груза, вызывающего движение неуравновешенного конуса. Для исключения воздействия силы инерции на измерения в работе [15] был предложен пластометр с постоянной скоростью погружения конуса, движение которого не связано со снятием груза. Во время работы конус остается неподвижным, а его внедрение

происходит за счет подъема электроприводом столика, на котором находится образец, с заданной постоянной скоростью.

Использование пластометра с постоянной скоростью погружения конуса увеличило воспроизводимость измерений [15], но, как оказалось [16], не устранило их неинвариантности. Данные по пластической прочности одного и того же материала, полученные при разных глубинах погружения конуса, разных углах при его вершине, заметно различались между собой. Оказалось, что и величина скорости, с которой внедряется конус, также влияет на результаты измерений. Эта неинвариантность была связана не с конструкцией прибора, а с теорией метода, которая устанавливала бы новый подход к раскрытию связи между параметрами, характеризующими условия внедрения конуса, и свойствами среды. В этой связи предпринимались различные попытки [17–20] с разными материалами и в рамках многих отраслей промышленности, направленные на усовершенствование методики определения пластической прочности или предельного напряжения сдвига (что по отношению к последнему термину в традиционном методе конического пластометра звучит не вполне корректно), но ученые ограничивались нахождением только обозначенной выше реологической характеристики и не ставили целью определение как минимум еще одной важнейшей характеристики – эффективной вязкости, что заранее обусловило недостаточное соответствие указанных методик современным требованиям технологии строительных материалов.

Основное отличие предлагаемой методики состоит в том, что в условиях отсутствия влияния сил инерции на погружение конуса в среду появляется возможность вместо пластической прочности определять текущие значения напряжения сдвига в слое материала, прилегающем к поверхности конуса, и на основании непрерывной или дискретной зависимости напряжения сдвига от градиента скорости сдвига, который связан с глубиной погружения конуса, получать реологические характеристики, а именно предельное напряжение сдвига и вязкость.

Главное предположение рассматриваемой методики: направление движения частиц среды в слое материала, прилегающем к поверхности конуса, происходит параллельно образующей конуса (рис. 1).

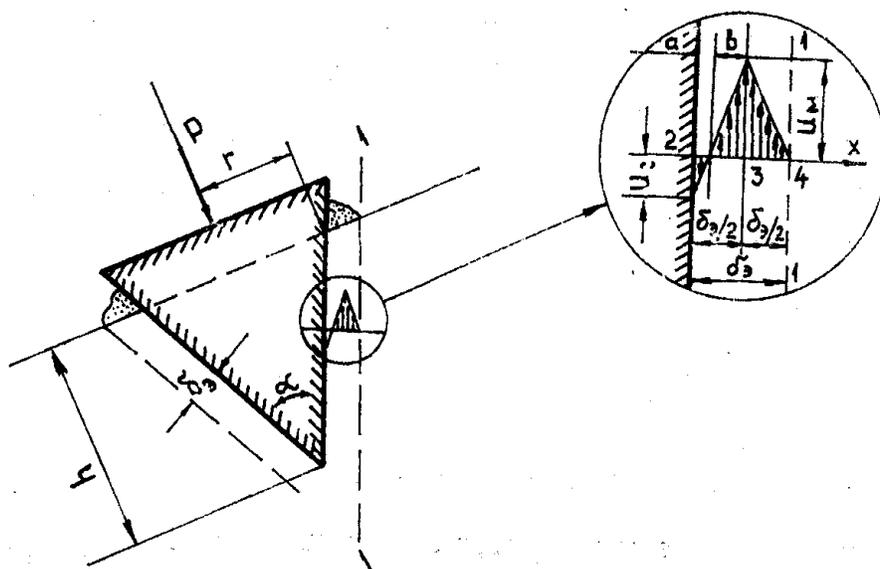


Рис. 1. Схема движения среды при погружении конуса

Частицы среды, прилегающие к шероховатой поверхности конуса, будут двигаться вместе с конусом. Скорость этих частиц U_c в указанном направлении можно выразить как

$$U_c = U_k \cdot \cos \frac{\alpha}{2},$$

где U_k – скорость погружения конуса в направлении, перпендикулярном поверхности среды.

На граничной поверхности 1–1, разделяющей движущийся поток и неподвижную среду, скорость частиц равна нулю. Вместо неизвестной истинной толщины деформируемого слоя среды введем эквивалентную ей величину δ_3 , одинаковую у всей погруженной поверхности конуса. Будем считать, что толщина слоя среды, прилипающего к поверхности конуса и движущегося вместе с ним, настолько мала, что ею можно пренебречь. Тогда из принятого положения об отсутствии сжатия среды должно выполняться условие: при погружении конуса на глубину dh приращение объема погруженной части конуса dV должно быть равно объему выдавливаемой из лунки среды $dS \cdot \delta_3$ (dS – приращение боковой поверхности конуса при погружении его на глубину dh). Это условие можно записать так:

$$\frac{dS}{dh} \cdot \delta_3 = \frac{dV}{dh}. \quad (1)$$

Выразив через h боковую поверхность конуса S ($S = \frac{\pi h^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}$) и его объем V ($V = \frac{1}{3} \pi h^3 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}$), после дифференцирования и подстановки в выражение (1) вычислим δ_3 :

$$\delta_3 = 1/2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot h.$$

Распределение скоростей движения среды в обтекающем конус потоке находим, приняв данные ниже соображения.

Между двумя поверхностями, разделяющими движущийся поток и неподвижную среду (см. рис. 1), будет существовать течение, направленное в сторону, противоположную движению конуса, и выносящее частицы из лунки на поверхность среды. Примем, что максимальная скорость в этом течении приходится на середину толщины деформируемого слоя и равна U_m . Эпюра скоростей в потоке, построенная на основе принятых допущений, показана выше (см. рис. 1).

Найдем среднее значение градиента скорости в потоке, обтекающем конус. Согласно условию неразрывности потока, при одинаковой вдоль образующей конуса толщине деформируемого слоя δ_3 средняя скорость в потоке U_n как у вершины конуса, так и на выходе выдавливаемой смеси из лунки будет одинаковой. Определим эту скорость на выходе из лунки. При погружении конуса на глубину h выдавливание смеси из лунки будет происходить по кольцевому сечению площадью

$$F_n = \pi \left[\left(r + \frac{\delta_3}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right)^2 - r^2 \right] \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Для упрощения вычислений, учитывая, что

$$\left(\frac{\delta_3}{\cos \frac{\alpha}{2}}\right)^2 \ll 2r \frac{\delta_3}{\cos \frac{\alpha}{2}},$$

в дальнейшем будем считать $F_{\pi} = 2\pi r \delta_3$. Очевидно, что скорость U_{π} получим из условия

$$\frac{dV}{dt} = F_{\pi} \cdot U_{\pi}, \quad (2)$$

где $\frac{dV}{dt}$ – производная по времени от объема погруженной части конуса (объема лунки).

В формуле для объема погруженной части конуса $V = 1/3\pi r^2 h$ выразим r через h : $r = h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$, а h – через скорость и продолжительность опускания конуса: $h = U_k \cdot t$. Подставив в выражение для объема V найденные значения r и h и продифференцировав по t , используя выражение (2), найдем

$$U_{\pi} = U_k \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = U_c. \quad (3)$$

Средняя скорость смеси, выдавливаемой из лунки, или средняя скорость в потоке в направлении, противоположном движению конуса, оказывается равной проекции скорости погружения конуса на направление его образующей.

Очевидно, что площадь эпюры скоростей, показанная на рис. 1, если считать скорости, направленные вверх с положительным, вниз – с отрицательным знаками, будет равна произведению средней скорости в потоке U_{π} на толщину деформируемого слоя δ_3 :

$$-1/2aU_c + 1/2bU_m + 1/4\delta_3 U_m = \delta_3 U_{\pi}. \quad (4)$$

Заменив в последнем уравнении U_{π} равной ей величиной U_c и приняв во внимание геометрические соотношения $\frac{U_m}{U_c} = \frac{b}{a}$; $a + b = 0,5\delta_3$ (см. рис. 1), найдем значения

$$a = 0,5\delta_3 \frac{1}{1 + \frac{U_m}{U_c}}$$

и

$$b = 0,5\delta_3 \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{U_m}{U_c}}\right).$$

Подставив значения a и b в выражение (4) и обозначив $\frac{U_m}{U_c} = z$, получим уравнение $z^2 - 3z - 4 = 0$, из которого вычислим $z = \frac{U_m}{U_c} = 4$ или (с учетом равенства (3)) $U_m = 4U_c = 4U_k \cos \frac{\alpha}{2}$.

Определив величины скоростей, показанных на эпюре (см. рис. 1), можно перейти к расчету среднего значения градиента скорости в потоке, обтекающем конус. При этом ось x направим перпендикулярно образующей конуса. Среднее значение градиента в потоке найдем как половину суммы градиентов скорости на участках 2–3 и 3–4 (см. эпюру

на рис. 1), считая градиенты положительными, если с увеличением x скорость возрастает, и отрицательными, если она убывает:

$$\left(\frac{dU}{dx}\right)_{cp} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_m - (-U_c)}{0,5\delta_3} - \frac{U_m}{0,5\delta_3} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{5U_c}{0,5\delta_3} - \frac{4U_c}{0,5\delta_3} \right) = \frac{U_c}{\delta_3}.$$

Подставим в последнее выражение значения U_c и δ_3 , определенные ранее, и получим

$$\left(\frac{dU}{dx}\right)_{cp} = \frac{U_c}{\delta_3} = \frac{U_k \cos \frac{\alpha}{2}}{1/2 \sin \frac{\alpha}{2} h} = 2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{U_k}{h} = K \frac{U_k}{h}, \quad (5)$$

где $K = 2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$.

Схема для расчета зависимости между силой и деформацией при движении конуса представлена на рис. 2а. Вырезанная с поверхности конуса площадка скользит по поверхности среды бесконечной глубины. Эпюра скоростей в деформируемом при движении площадке слое среды необычна и имеет вид, показанный на рис. 2. Условия, за счет которых создается такое распределение скоростей, были рассмотрены выше. Эта схема отличается от классической (рис. 2б) характером эпюры скоростей, а также тем, что при постоянной скорости движения площадки толщина слоя δ , в нашем случае переменна согласно выражению (2), а в классической схеме она постоянна.

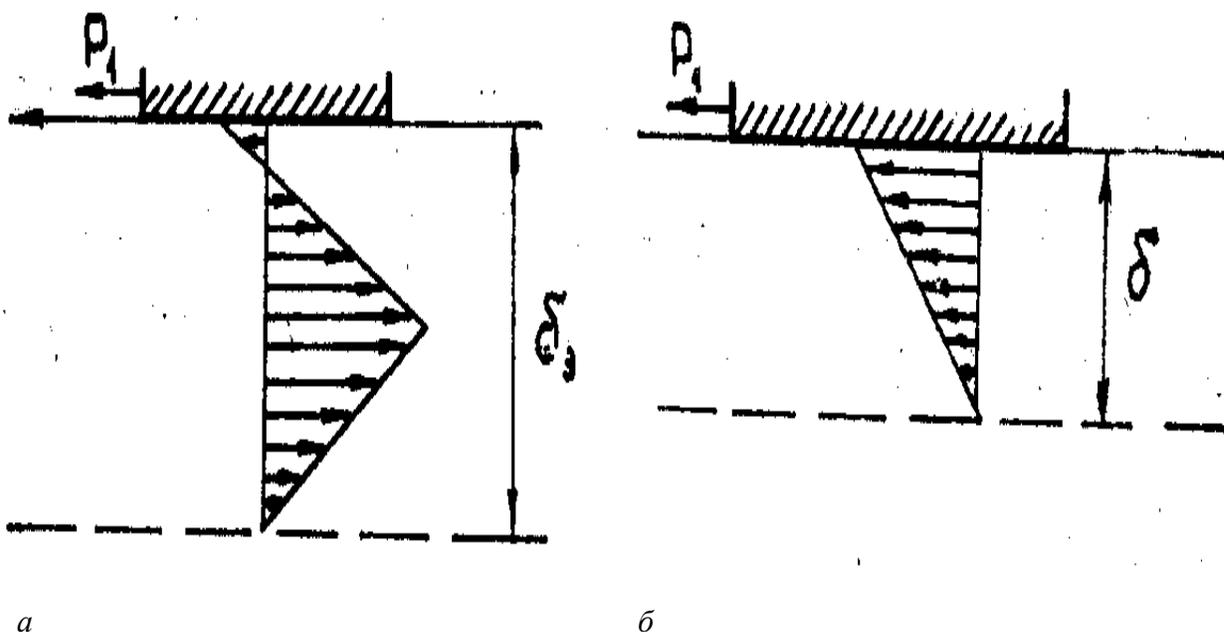


Рис. 2. Эпюры скоростей в деформируемом слое среды в схеме:
а – для расчета зависимости между силой и деформацией
при движении конуса; б – классической

Зависимость между градиентом скорости в обтекающей площадке потока и силой P_1 (или напряжением сдвига на границе между площадкой и средой $\sigma = \frac{P_1}{F_1}$, где F_1 – поверхность, по которой площадка соприкасается со средой) для ньютоновских жидкостей описывается уравнением Ньютона. Для пластично-вязких сред, подчиняющихся уравнению Шведова – Бингама, к которым относятся многие сырьевые смеси, используемые в производстве строительных материалов, указанная зависимость будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta \frac{dU}{dx}. \quad (6)$$

Если в соответствии с рассмотренной схемой применяется уравнение (6) для описания внедрения конуса в пластично-вязкую среду, напряжение сдвига σ на поверхности конуса определяется в момент уравнивания силы, действующей на конус со стороны поднимающегося со скоростью U_k образца среды, весом конуса P . Тогда величина σ подсчитывается по известной формуле [2]:

$$\sigma = \frac{P}{S} \cos \frac{\alpha}{2} = K_1 \frac{P}{h^2},$$

где S – проекция боковой поверхности конуса на плоскость, перпендикулярную оси конуса.

Вместо $\frac{dU}{dx}$ в уравнение (5) подставляется найденное среднее значение градиента скорости сдвига $K \frac{U_k}{h}$.

Выполнив указанные подстановки, получим расчетное уравнение для определения предельного напряжения сдвига σ_0 и вязкости η пластично-вязкой среды на конусном пластометре, работающем при постоянной скорости внедрения конуса:

$$K_1 \frac{P}{h^2} = \sigma_0 + \eta K \frac{U_k}{h}. \quad (7)$$

где K и K_1 – постоянные, зависящие от угла при вершине конуса α .

Признаком, по которому можно судить, соответствует ли уравнение (7) экспериментальным данным, является расположение на одной прямой экспериментальных точек, полученных при измерениях глубин внедрения конуса h при различных значениях P , постоянной скорости его движения U_k и нанесенных на график в координатах $\sigma = K_1 \frac{P}{h^2} - \frac{U_k}{h}$.

На рис. 3 показаны графики зависимостей $\sigma = f\left(\frac{U_k}{h}\right)$ для уплотненной прессованием смеси из одной части молотого песка с удельной поверхностью $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ и трех частей Вольского песка естественной дисперсности при пористости 42 % и влажности 4 %. Экспериментальные точки для каждой из трех скоростей погружения конуса U_k , равных 0,029, 0,058 и 0,116 см/с, располагаются на прямых, которые сходятся в точке, соответствующей σ_0 . Тангенс угла наклона прямых к горизонтальной оси равен вязкости $\eta \cdot K$. Графики показывают, что экспериментальные точки хорошо располагаются на прямых. Следовательно, уравнение (7) соответствует экспериментальным данным, а величина предельного напряжения сдвига инвариантна к изменениям глубины и скорости погружения конуса.

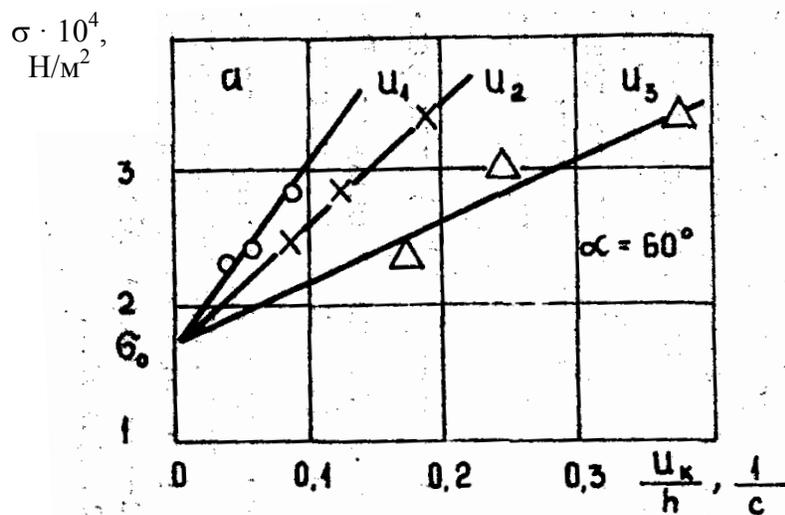


Рис. 3. Зависимости напряжения сдвига от градиента скорости сдвига для смеси из одной части молотого песка с удельной поверхностью $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ и трех частей Вольского песка естественной дисперсности при пористости 42 % и влажности 4 %

На рис. 4 изображено сравнение данных по предельному напряжению сдвига, полученных на коническом пластометре и рассчитанных по изложенной теории, с реологическими характеристиками, полученными для того же материала по методу Вейлера – Ребиндера. Можно отметить вполне удовлетворительную сходимость.

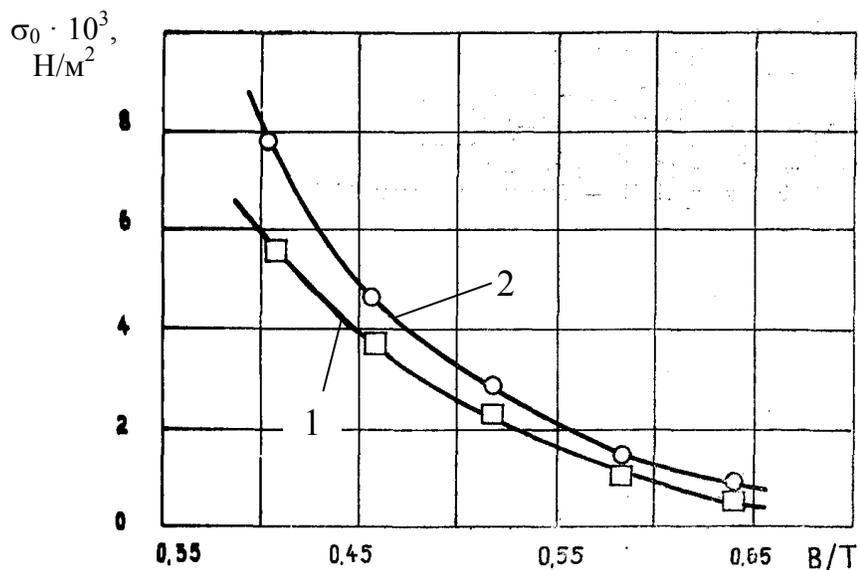


Рис. 4. Зависимости предельного напряжения сдвига от водотвердого отношения (В/Т) для глиняного теста, полученные по методу Вейлера – Ребиндера (1) и на конусном пластометре по предлагаемой методике (2)

Из уравнения (7) следует, что с увеличением глубины погружения конуса ее влияние на величину σ_0 (а следовательно, на степень неинвариантности измерений σ_0) уменьшается. К такому же выводу пришли (но исходя из других соображений) в статье [12].

В работах по пенетрации грунтов [10] указывается, что истинная величина удельной прочности пенетрации достигается при $h \rightarrow \infty$. Такой же вывод следует и из уравнения (7). На этом основании пенетрационные испытания грунтов ведутся при глубинах погружения конуса более 15 мм. Изучение свойств дисперсных систем в технологии производится обычно при глубинах менее 10 мм. В этом одна из причин большей инвариантности измерений при пенетрации грунтов по сравнению с исследованиями технологов.

Применение рассмотренной методики расчета пластично-вязких характеристик превращает пластометр в конусный реометр, на котором можно измерять как предельное напряжение сдвига, так и вязкость дисперсных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейлер С.Я., Ребиндер П.А. Исследования упругопластических свойств и тиксотропии дисперсных систем (суспензий, эмульсий и коллоидных растворов) // *Доклады АН СССР*. 1945. Т. 49. № 5. С. 354–357.
2. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Исследование золь-гель перехода реологическими методами. Часть I. Методы проведения экспериментов // *Нанотехнологии в строительстве*. 2017. Т. 9. № 4. С. 74–92.
3. Новые физические методы исследования торфа / под ред. проф. М.П. Воларовича и канд. техн. наук Н.В. Чураева. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 228 с.
4. Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Урманчиев С.Ф. О критических условиях теплообмена при течении жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры в кольцевом канале // *Прикладная математика и механика*. 2023. Т. 87. № 3. С. 369–378.
5. Parteli E., Schmidt J., Blumel C., Wirth K.-E., Peukert W., Poschel T. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders. URL: https://www.researchgate.net/publication/265299478_Attractive_particle_interaction_forces_and_packing_density_of_fine_glass_powders (дата обращения: 03.09.2024).
6. Ku N., Hare C.L., Ghadiri M., Murtagh J.M., Oram P., Haber R.A. Auto-granulation of fine cohesive powder by mechanical vibration // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 102, pp. 72–80.
7. Bakkar S., Wall M., Ku N., Berman D., Aouadi S., Brennan R.E., Young M.L. Al/Al₂O₃ metal matrix composites produced using magnetic field-assisted freeze-casting of porous ceramic structures. URL: https://www.researchgate.net/publication/350477052_AlAl2O3_metal_matrix_composites_produced_using_magnetic_field-assisted_freeze-casting_of_porous_ceramic_structures (дата обращения: 03.09.2024).
8. Белов В.В. Капиллярная аутогезия в трехфазных сырьевых смесях. *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации: Сборник научных трудов*. М.: РААСН, 2019. С. 58–68.
9. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Основные подходы к моделированию процессов отверждения в нанодисперсных силикатных системах. Ч. III // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 1. Ч. 2. С. 52–86.
10. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М.: Стройиздат, 1968. 182 с.

11. Ребиндер П.А., Семенов Н.А. О методике погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // *Доклады АН СССР*. 1949. Т. 14. № 6. С. 20–25.
12. Гораздовский Т.Я., Ребиндер П.А. К теории конического пластометра // *Коллоидный журнал*. 1970. Т. 32. № 4. С. 512–519.
13. Ямпольский Б.Я., Ребиндер П.А. Исследование структурно-механических свойств металлических дисперсных систем методом конического пластометра // *Коллоидный журнал*. 1948. Т. 6. С. 466–469.
14. Закипная Е.В., Зарицкая В.В. Реология: учебное пособие. Благовещенск: Изд-во Дальневосточного ГАУ, 2015. 108 с.
15. Берней И.И. Исследование структурно-механических пластично-вязких сред на конических пластометрах // *Строительные материалы*. 1973. № 7. С. 45–47.
16. Берней И.И., Белов В.В. Теория и метод измерения вязкости и предельного напряжения сдвига дисперсных систем на усовершенствованном коническом пластометре // *Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума*. Рига: РПИ, 1979. С. 144–146.
17. Веретенникова М.А., Степанова Э.Ф., Провоторова С.И., Смирных А.А. Структурно-механические исследования в разработке карандашей // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21279> (дата обращения: 04.09.2024).
18. Пшеничный Г.Н. Установка для изучения структурообразования цементных систем // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 21–23.
19. Прокофьев В.Ю. Экспериментальные методы в технологии порошковых и компактированных материалов: учебное пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2015. 117 с.
20. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Анализ методов определения пределов пластичности грунтов // *Научные труды КубГТУ*. 2015. № 10. С. 340–356.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 1. Теоретическое обоснование метода // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 72–82.

**DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES
OF SOLID DISPERSED SYSTEMS USED IN THE PRODUCTION
OF BUILDING MATERIALS
APPLYING CONE PENETRATION TECHNIQUE.
PART 1. THEORETICAL JUSTIFICATION
OF THE METHOD**

V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that penetrometry based on immersion of a conical indenter into the studied medium has great advantages for determining the rheological characteristics of structured dispersed systems. It is indicated that the main problem in the use of conical plastometers is the reliability of the results obtained. It has been demonstrated that most compacted three-phase systems are solid-like and their recovery periods of broken bonds are shortened. For such systems, a method for determining rheological characteristics using a penetration rheometer has been developed and considered based on model representations of the deformation pattern of the medium in the zone of cone insertion with a constant velocity. It is concluded that the application of the described technique makes it possible to measure both the limiting shear stress and the viscosity of structured dispersed systems.

Keywords: rheological characteristics, penetrometry, structured dispersed systems, limiting stress, shear, viscosity, cone penetration method, deformation of the medium, cone.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 1. Theoretical justification of the method // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 72–82.

УДК 621.45.038.72

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
И ОЦЕНКА РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ
ТЕТРАМЕТИЛЕНДИЭТИЛЕНТЕТРАМИНА***Е.А. Виноградова, В.П. Молчанов, О.Г. Шилова
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Виноградова Е.А., Молчанов В.П.,
Шилова О.Г., 2024

Аннотация. Рассмотрен потенциал нового материала – тетраметилендиэтилентетрамина (ТМДЭТА) – для создания эффективного антикоррозионного покрытия. Представлены результаты исследований реакционной способности ТМДЭТА в различных растворителях.

Ключевые слова: тетраметилендиэтилентетрамин, макроциклический аминал, коррозия, металл, растворитель, защитный слой.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-83-88

Коррозионный процесс приводит к разрушению металлов и ухудшению их механических характеристик, что, в свою очередь, влечет за собой значительные экономические, производственные потери и угрозу безопасности. Поэтому актуальность создания эффективных антикоррозионных покрытий постоянно растет, их разработка и применение являются приоритетными задачами в различных сферах промышленности и строительства.

Использование новых материалов в составе покрытий – одно из основных направлений в области их создания. Развитие технологий и проведение научных исследований способствуют появлению материалов, обладающих более высокими антикоррозионными свойствами, улучшенными механическими характеристиками, повышенной стойкостью к внешним воздействиям и экологической безопасностью. Одним из таких перспективных материалов является тетраметилендиэтилентетрамин (ТМДЭТА), который предполагается использовать в составе антикоррозионных покрытий для повышения их защитных свойств и долговечности.

Кристаллическая структура ТМДЭТА имеет форму шара, конформацию циклогексана из-за своей жесткости и состоит из сросшихся семичленных колец (рис. 1).

Макроциклический аминал – 1,3,6,8-тетраазатрицикло[4.4.1.1^{3,8}]додекан, тривиально называемый ТМДЭТА [2]; брутто-формула: $C_8H_{16}N_4$. Макроциклические аминалы – это неэлектролиты, имеющие симметричную структуру, они хорошо растворимы в воде и полярных растворителях. Эти соединения представляют значительный интерес из-за их теоретической важности и применения в фармацевтической, строительной, нефтегазовой промышленности [3].

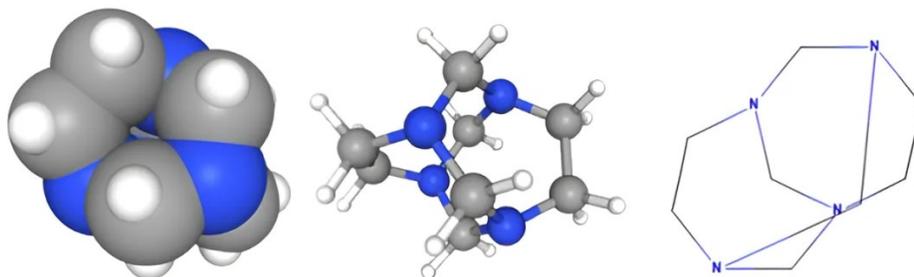


Рис. 1. Химическая структура ТМДЭТА

Тетраметилендиэтиленetetрамин является химическим соединением с большой долей азотсодержащих групп. Он обладает уникальными свойствами, которые делают его эффективным в качестве ингибитора коррозии [1]; ТМДЭТА перспективен для создания антикоррозионных покрытий благодаря своей способности образовывать защитный слой на металлической поверхности, который предотвращает контакт металла с агрессивными средами и замедляет процесс саморазрушения металла.

Уникальность ТМДЭТА заключается в следующем:

1) химической стабильности; она означает, что ТМДЭТА может противостоять неблагоприятным условиям окружающей среды, таким как высокая температура, влажность и соленость, за счет своей циклической структуры. Макроциклические амины способны удерживать ионы, что приводит к диспергирующему эффекту, а значит, к стабилизации молекулы; могут взаимодействовать с металлами, образуя стабильные комплексы;

2) смачиваемости, то есть способности образовывать стабильные комплексы с различными металлами и ионами. Тетраметилендиэтиленetetрамин обладает гибкой структурой, что позволяет ему эффективно охватывать и удерживать металлы внутри цикла. Благодаря этому он проявляет отличные свойства смачиваемости, способствуя хорошему распределению на поверхности и обеспечивая стабильное сцепление с подложкой;

3) устойчивости к коррозии, которая означает способность образовывать защитные пленки на металлических поверхностях, что препятствует контакту металла с коррозионными агентами. Это свойство является ключевым для антикоррозионных покрытий, так как оно обеспечивает долгосрочную защиту металлических конструкций и тем самым долговечность и увеличение срока службы сооружений;

4) электролитической способности, благодаря которой ТМДЭТА может выступать как солеобразующий компонент. Комплексы ТМДЭТА с ионами металлов замедляют коррозию, так как они препятствуют проникновению кислорода и воды к поверхности металла. Кроме того, ТМДЭТА может участвовать в электролитическом процессе, который протекает при коррозии металла. В этом процессе металл выступает и как анод, на котором происходит его окисление, и как катод, где имеет место восстановление кислорода, а ТМДЭТА образует ионы, которые проникают в раствор и влияют на скорость коррозии металла.

Устойчивость ТМДЭТА в растворителях – важный параметр для создания покрытий [4]. С целью определения растворимости ТМДЭТА был проведен количественный анализ (при этом использовался газовый хроматомаcс-спектрометр). В

качестве растворителей были выбраны ортоксилол, изопропиловый спирт и бутилацетат. Они являются базовыми в создании антикоррозионных покрытий.

В приборе была установлена капиллярная колонка НР-1 (100 м × 0,25 мм, толщина пленки составила 0,5 мкм) в режиме программирования температуры термостата: 120 °С (6 мин) → 260 °С (10 °С/мин) → 260 °С (30 мин) → 300 °С (15 °С/мин). Температура испарителя и детектора хроматомасс-спектрометра составляла 260 °С. Газ-носитель – гелий. Линейная скорость потока газа-носителя равнялась 20 см/с, продолжительность анализа – 60 мин.

Результаты представлены на рис. 2–4 и в табл. 1–3, из которых видно, что ТМДЭТА лучше растворяется в изопропиловом спирте, а не в ксилоле и бутилацетате. Это обусловлено тем, что использованный спирт, как полярный растворитель, обладает большей способностью к образованию водородных связей и взаимодействию с молекулами ТМДЭТА. Кроме того, изопропиловый спирт имеет хорошую совместимость с другими компонентами антикоррозионных покрытий.

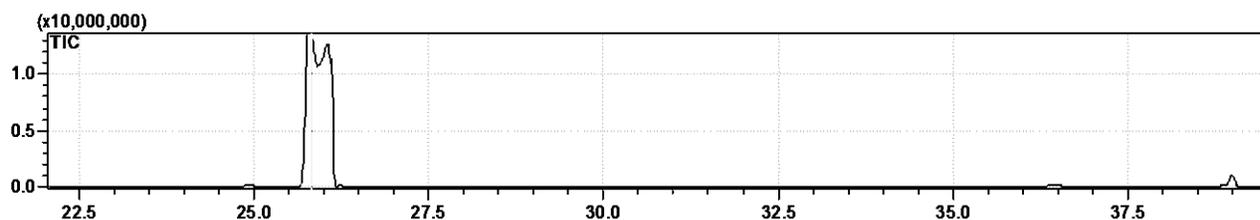


Рис. 2. Хроматограмма по ионному току о-ксилола и ТМДЭТА

Таблица 1

Качественные параметры растворения ТМДЭТА в о-ксилоле

Пик	Время удерживания, мин	Площадь пика, мм ²	Площадь пика, %	Высота пика, мВ	Высота пика, %
О-ксилол	25,815	295358036	98,08	14393296	93,47
ТМДЭТА	38,997	5779814	1,92	1004872	6,53

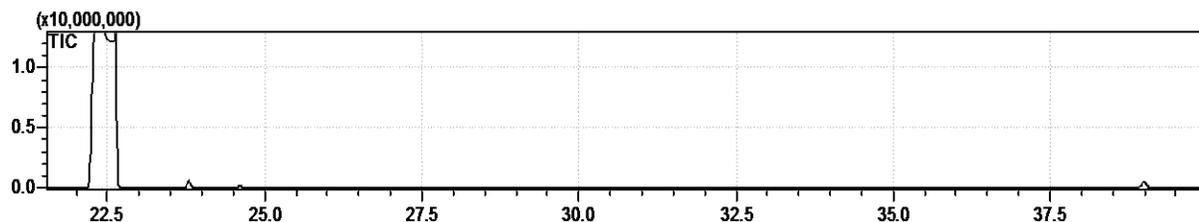


Рис. 3. Хроматограмма по ионному току бутилацетата и ТМДЭТА

Таблица 2

Качественные параметры растворения ТМДЭТА в бутилацетате

Пик	Время удерживания, мин	Площадь пика, мм ²	Площадь пика, %	Высота пика, мВ	Высота пика, %
Бутилацетат	22,336	317242176	99,24	14649003	96,88
ТМДЭТА	38,994	2432470	0,76	472361	3,12

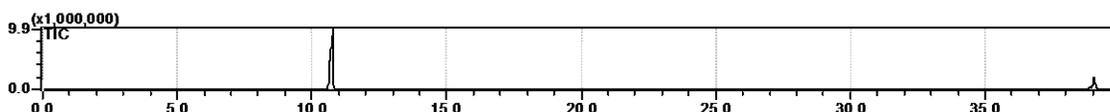


Рис. 4. Хроматограмма по ионному току изопропилового спирта и ТМДЭТА

Таблица 3

Качественные параметры растворения ТМДЭТА в изопропиловом спирте

Пик	Время удерживания, мин	Площадь пика, мм ²	Площадь пика, %	Высота пика, мВ	Высота пика, %
Изопропиловый спирт	10,800	79160112	88,34	9867188	83,56
ТМДЭТА	39,047	10452485	11,66	1926880	16,34

Таким образом, изучение свойств ТМДЭТА помогло определить его потенциал как ингибитора коррозии. Использование изопропилового спирта в качестве растворителя для ТМДЭТА при создании антикоррозионного покрытия может обеспечить более эффективное и равномерное распределение на поверхности, что, в свою очередь, улучшит защитные свойства покрытия и продлит срок его службы. Понимание влияния растворителя на реакционную способность ТМДЭТА является ключом к оптимизации синтеза антикоррозионного состава на его основе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 19189ГУ/2023 от 12 марта 2024 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rivera A., Sadat-Berna J., Ríos-Motta J., Dušek M., Palatinus L. Synthesis and structural studies of a new class of quaternary ammonium salts, which are derivatives of cage adamanzane type amination 1,3,6,8-tetraazatricyclo[4.3.1.1^{3,8}]undecane (TATU) // *Chemistry Central Journal*. 2011. № 5. URL: https://www.researchgate.net/publication/51657301_Synthesis_and_structural_studies_of_a_new_class_of_quaternary_ammonium_salts_which_are_derivatives_of_cage

adamanzane_type_aminol_1_3_6_8-tetraazatricyclo4311undecane_TATU (дата обращения: 14.06.2024).

2. Rivera A., Núñez M.E., Avella E., Ríos-Motta J. NMR study of sequential intermediates and collateral products in the conversion of 1,3,6,8-tetraazatricyclo[4.4.1.1^{3,8}]dodecane (TATD) to 1,3,6,8-tetraazatricyclo[4.3.1.1^{3,8}]Undecane (TATU) // *Tetrahedron Letters*. 2008. V. 49. Iss. 13, pp. 2154–2158.

3. Romero C.M., Mesa H.J. Effect of temperature on the partial molar volumes and viscosities of two macrocyclic aminols in water and deuterium oxide // *Journal of Molecular Liquids*. 2017. № 242, pp. 244–248.

4. Fang Z., Wang G., Xiong Y., Li Y., Yang Y., Huang L., Wang P., Liao J., Wang A., Plucknett K., Rhee K.Y. Anti-corrosion performance of polyaniline coated basalt rockwool wastes/epoxy resin coatings // *Coatings*. 2021. № 11 (4). URL: https://www.researchgate.net/publication/350919099_Anti-Corrosion_Performance_of_Polyaniline_Coated_Basalt_Rockwool_WastesEpoxy_Resin_Coatings (дата обращения: 14.06.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВИНОГРАДОВА *Елизавета Андреевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vinogradli27@yandex.ru

МОЛЧАНОВ *Владимир Петрович* – доктор химических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: science@science.tver.ru

ШИЛОВА *Ольга Геннадьевна* – старший преподаватель кафедры иностранных языков, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: shilovaolga71@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Виноградова Е.А., Молчанов В.П., Шилова О.Г. Исследование свойств и оценка реакционной способности тетраметилендиэтиленetetрамина // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 83–88.

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES AND DETERMINATION OF THE TETRAMETHYLENEDIETHYLENETETRAMINE REACTIVITY

E.A. Vinogradova, V.P. Molchanov, O.G. Shilova
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article examines the potential of the new tetramethylenediethylenetetramine (TMDDET) material to create an effective anticorrosive coating. The results of studies of the reactivity of TMDDET in various solvents are presented.

Keywords: tetramethylenediethylenetetramine, macrocyclic aminol, corrosion, metal, solvent, protective layer.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

VINOGRADOVA Elizaveta Andreevna – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vinogradli27@yandex.ru

MOLCHANOV Vladimir Petrovich – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: science@science.tver.ru

SHILOVA Olga Gennadiyevna – Senior Lecturer of Department of Foreign Languages, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shilovaolga71@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Vinogradova E.A., Molchanov V.P., Shilova O.G. Investigation of the properties and determination of the tetramethylenediethylenetetramine reactivity // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 83–88.

УДК 550.837:621.396.96

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ В САПРОПЕЛЕ
И ОТРАЖЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ВОДА – САПРОПЕЛЬ
С ПОМОЩЬЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ**

Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Иванов Г.Н., Кривенко И.В.,
Смирнова М.А., Испирян С.Р., 2024

Аннотация. Отмечено, что качественные характеристики сапропелей (влажность, плотность, зольность), а также загазованность влияют на их акустические свойства, что необходимо учитывать при изучении сапропелевых отложений с помощью метода звуколокации. Приведены результаты исследований сапропеля, реализованных на гидроакустической трубе. Указано, что выбор звуковых частот образцов сапропеля связан с параметрами трубы. Для исследований использовались образцы сапропелей из озер Тверской, Владимирской и Рязанской областей, отличающихся условиями формирования донных отложений и основными характеристиками. Продемонстрировано, что увеличение влажности сапропелей ведет к уменьшению коэффициента отражения звуковой волны. На основе измерений коэффициентов отражения на границе сапропеля с водой и коэффициентов поглощения сапропелей, различающихся по влажности и плотности, сделаны выводы об их составе, физико-механических свойствах и воздействии на качество звуколокационной съемки.

Ключевые слова: сапропель, звуколокация, гидроакустическая труба, коэффициент поглощения, коэффициент отражения, частота, дисперсия скорости звука, зондирующий импульс.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-88-101

ВВЕДЕНИЕ

Сапропели – илистые донные отложения пресноводных водоемов – образуются в результате воздействия многих факторов (механических, биохимических и микробиологических процессов).

Образование сапропеля обуславливается характером водоема. Обычно мощность сапропелевых отложений в озерах составляет порядка 3–10 м. Общий запас разведанных сапропелевых месторождений в Российской Федерации – около 230 млрд м³. Отметим, что с каждым годом объем запасов сапропеля возрастает.

Область применения сапропеля очень широка. Например, они используются в следующих целях:

для производства органоминеральных удобрений, содержащих основные элементы питания растений (гумус, азот и микроэлементы); эти удобрения увеличивают содержание в почве подвижных форм фосфора и калия;

минимизации отрицательного влияния на почвы, пригодные для земледелия, отходов промышленных производств (гуминовые кислоты, входящие в состав сапропелей, образуют прочные соединения с ионами металлов и являются геохимическим барьером для опасных веществ);

создания добавок-антиокислителей (биологически ценных компонентов) при производстве гранулированных комбикормов;

разработки препаратов, положительно влияющих на нервную, эндокринную, сердечно-сосудистую систему человека, его опорно-двигательный аппарат и стимулирующих процессы метаболизма в печени;

производства продуктов их переработки, таких как деготь, фенолы, аммиак, ацетон и газообразные продукты (H₂S, CH₄, N₂ и др.), углеродные материалы и сорбенты широкого спектра (вышеназванные материалы и сорбенты применяются для сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности воды и любой твердой поверхности, очистки сточных вод).

Свойства сапропелей разнообразны и обусловлены генезисом, поэтому сфера и способ их использования зависят от состава, физико-химических, физико-механических и других параметров [1].

Качественные характеристики сапропелей (влажность, плотность, зольность) обуславливают акустические свойства. При уменьшении влажности и увеличении плотности по мере возрастания глубины слоя сапропеля наблюдается незначительное увеличение скорости, а коэффициент поглощения при этом повышается в 1,5–2 раза. С увеличением зольности возрастает скорость звука и снижается коэффициент поглощения [2]. Однако существенное влияние на акустические свойства оказывает загазованность образцов, что ведет к увеличению сжимаемости или уменьшению модуля объемной упругости сапропеля. Изменение содержания газовой фазы на 1–2 % меняет акустические свойства сапропеля значительно больше, чем изменение влажности и зольности на 10 % и более. Это продемонстрировано при исследовании вакуумированных образцов сапропеля.

Для пресной воды скорость звука равна 1480–1490 м/с; коэффициент поглощения при частоте $f = 100$ кГц равен 10^{-3} м^{-1} . Для водонасыщенного песка скорость звука составляет 1580–1800 м/с, а коэффициент поглощения при 30–50 кГц равен 18 м^{-1} . Из этого следует, что сапропель по своим акустическим свойствам отличается от воды и песка, который часто служит подстилающей сапропель породой [3].

Одной из важнейших характеристик при оценке возможностей метода звуколокации при разведке озер на сапропель выступает коэффициент отражения на границе вода – сапропель. При слишком малом его значении граница будет нечеткой, отраженный сигнал может оказаться ниже порога чувствительности приемного устройства аппаратуры. Если коэффициент отражения стремится к единице, то преломленная волна будет иметь небольшую долю энергии и глубина ее проникновения окажется недостаточной для определения толщины слоя сапропеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$ на границе двух сред может быть найден косвенно, а именно путем измерения акустической жесткости для двух сред:

$$K_{\text{отр}} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1},$$

где $\rho_i v_i$ – акустические жесткости (волновые сопротивления) сред ($i = 1, 2, 3 \dots$); ρ_i – плотность; v_i – скорость звука в средах.

В экспериментах на гидроакустической трубе [4] коэффициент отражения определяется непосредственно по экрану осциллографа. Метод основывается на том, что в трубе с акустически жесткими стенками, представляющей собой акустический волновод, из всего возможного в ней спектра нормальных волн при возбуждении на частотах, удовлетворяющих условию

$$f = \frac{0,586 \cdot v}{d}, \quad (1)$$

где v – скорость звука в воде; d – внутренний диаметр трубы, распространяется только квазиплоская волна основной моды, аналогичная плоской волне в неограниченном полупространстве.

Помещая на одном конце трубы излучатель и приемник, а на другом – исследуемый образец, можно, сравнивая отраженные импульсы от образца и от свободной поверхности воды, измерять коэффициент отражения от образца. Если же приемник поместить со стороны образца, то можно определить и коэффициент поглощения в нем акустической энергии. Подобные установки применяются в гидроакустике для измерения акустических сопротивлений материалов (в частности, при исследовании звукопоглотителей).

Требуемая жесткость стенок может быть получена, если применять стальные трубы с толстыми стенками. Недостаточная жесткость вызывает уменьшение фазовой скорости звука.

Условие (1) и требование жесткости стенок легче удовлетворить, взяв трубы небольших диаметров. Однако диаметр должен быть не слишком мал. В противном случае образец окажется неподходящим. Требования к длине трубы обуславливаются возможностью раздельного наблюдения импульсов, отраженных от концов трубы на самой низкой измеряемой частоте.

При проведении экспериментов использовалась стальная труба с внутренним диаметром 58 мм, толщиной стенок 28 мм и длиной 180 см. Согласно приведенным размерам трубы, рабочие частоты, удовлетворяющие условию (1), находятся в диапазоне 5–15 кГц.

Схема лабораторной установки показана на рис. 1.

К нижнему концу трубы 1, заполненной водой, с помощью прижимной шайбы 6 и резиновых прокладок 4 крепилась медная или дюралюминиевая мембрана 5 толщиной 1 мм, к которой прижимались с помощью шайбы 7 излучатель и приемник 8. Образец 3, помещенный в специальный контейнер из оргстекла, вводился в трубу сверху. Для облегчения этой операции к верхнему концу трубы прикреплялся прозрачный раструб 2, позволяющий наклонно погружать контейнер с сапропелем в воду и визуально контролировать, чтобы на дне контейнера не образовывались пузырьки воздуха.

В качестве возбуждающего генератора и регистратора волновой картины использовался серийный прибор 9 – ультразвуковой дефектоскоп ДУК-20. Фильтр на 15 кГц имеется в схеме усилителя прибора. На частотах меньше 15 кГц применялся специально изготовленный выносной LC-фильтр – параллельный контур, настроенный на нужную частоту.

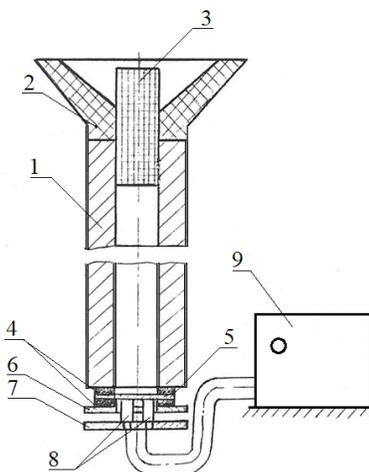


Рис. 1. Схема установки с гидроакустической трубой

Практика измерений показала, что состояние торцовых граней и внешней поверхности не оказывает заметного влияния на акустические измерения. Свойства трубы не ухудшаются от сверления отверстий в стенках для ее установки и крепления мембраны. Сила и равномерность прижатия датчиков к мембране значительно воздействуют на параметры системы и подбираются опытным путем. Нижняя поверхность мембраны для лучшего акустического контакта смазывается маслом. В качестве преобразователей использовались: на излучении – пьезопакеты из сегнетовой соли 45°-го среза с размерами 10 × 10 × 10 мм из 10 элементов; на приеме – целый куб с размерами 5 × 5 × 5 мм. Коэффициент отражения от алюминиевой мембраны достаточно высок, поэтому упругий импульс распространяется внутри трубы, поочередно отражаясь на ее концах и постепенно уменьшаясь по амплитуде. Длина трубы и скважность следования импульсов удовлетворяют условию свободного их прохождения без наложения прямого и отраженного сигналов. При измерении коэффициента поглощения излучатель и приемник

находились на разных концах трубы. Сравнивались амплитуды импульсов, прошедших через образец и без образца.

Амплитуда измеряемого импульса

$$A_{\text{изм}} = A_0(1 + K)e^{-\alpha H}, \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда импульса при отсутствии в трубе образца; α – коэффициент поглощения, м^{-1} ; H – длина образца, м ($H = 0,3$ м); K – коэффициент отражения от образца.

Из соотношения (2) следует, что

$$\alpha = \frac{1}{H} \cdot \ln \frac{A_0(1+K)}{A_{\text{изм}}}. \quad (3)$$

По формуле (3) рассчитывался коэффициент поглощения сапропеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По ходу экспериментов на гидроакустической трубе были получены данные, позволяющие судить об акустических свойствах сапропеля и их изменениях при различных параметрах акустического поля, а также при изменении физико-механических свойств самого сапропеля.

Для изменения влажности образец сапропеля разбавлялся дистиллированной водой. Если вес исходного образца сапропеля – P_1 , влажность – $W_{\text{н}}$, а плотность – $\rho_{\text{н}}$, то влажность W и плотность ρ полученной суспензии при доливании некоторого количества воды P_2 определяются по формулам:

$$W = \frac{P_1 \cdot W_{\text{н}} + P_2 \cdot 100}{P_1 + P_2};$$

$$\rho = \frac{P_1 \cdot \rho_{\text{н}} + P_2}{P_1 + P_2}.$$

Результаты измерений сведены в табл. 1 и 2, где A^c – зольность, % к сухому веществу; CaO – содержание окиси кальция, % к сухому веществу; W_o – влажность относительная, %; $K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения; α – коэффициент поглощения, м^{-1} .

Таблица 1

Изменения коэффициента отражения и поглощения
для различных образцов сапропеля в зависимости от влажности и плотности

Вид сапропеля	A^c	CaO	pH	W_o	ρ	$K_{\text{отр}}$	α
Известковый, оз. Татаровское (Владимирская область)	47,1	33,49	8,2	69,0;	1,19;	0,40;	8,5;
				75,0;	1,15;	0,34;	5,3;
				80,3	1,13	0,32	4,5
Глинисто-зоогеновый, оз. Коломенское (Тверская область)	50,1	2,79	5,6	94,1;	1,02;	0,18;	2,5;
				95,2;	1,01;	0,17;	6,4;
				96,2	1,01	0,14	3,2
Песчано-зоогеновый, оз. Ташное (Рязанская область)	52,3	2,40	6,0	87,7;	1,25;	0,34;	5,2;
				89,8;	1,10;	0,31;	8,2;
				91,3	1,09	0,30	7,7

Таблица 2

Изменения коэффициентов отражения и поглощения
в зависимости от частоты заполнения импульса для разных видов сапропеля

Вид сапропеля	A^c	СаО	W_o	ρ_s , г · см ⁻³	Частота, кГц							
					6,7		7,5		8,5		15	
					$K_{отр}$	α	$K_{отр}$	α	$K_{отр}$	α	$K_{отр}$	α
Известковый, оз. Татаровское (Владимирская область)	47,1	33,49	80	1,13	0,45	6,0	0,52	4,2	0,56	4,0	0,32	4,5
Глинисто-зоогеновый, оз. Коломенское (Тверская область)	50,1	2,79	96	1,01	0,40	4,8	0,47	4,6	0,56	3,2	0,15	3,6
Песчано-зоогеновый, оз. Ташное (Рязанская область)	52,3	2,40	91	1,09	0,46	8,4	0,52	7,5	0,54	4,0	0,30	8,4

Из приведенных данных видно, что коэффициент отражения от образцов сапропеля, как правило, выше расчетного. Это обстоятельство объясняется, во-первых, неравномерным распределением плотности сапропеля по высоте образца, а во-вторых, присутствием газообразной фазы во всех видах сапропеля в том или ином количестве. Следствием этого выступает увеличение коэффициента отражения по модулю, хотя знак коэффициента будет различным.

Из табл. 1 следует, что с увеличением влажности сапропелей уменьшается коэффициент отражения звуковой волны, так как акустическая жесткость, или волновое сопротивление, сапропеля стремится к акустической жесткости воды, а величина коэффициента отражения от какой-либо границы определяется разностью акустических жесткостей сред по обе стороны от нее (см. табл. 2). Увеличение влажности предполагает для одного и того же типа сапропеля снижение его плотности ρ_c и приближение к плотности воды ρ_w . То же самое можно сказать и о скорости распространения упругих волн.

Таким образом, $\rho_c v_c \rightarrow \rho_w v_w$, что вызывает выравнивание акустических жесткостей. Изменение волновой картины при отражении от свободной поверхности воды и от образца сапропеля приведено на рис. 2, в котором отраженный от образца импульс обозначен как I .

Коэффициент поглощения, как видно из табл. 1, также варьируется в зависимости от изменения влажности образца. Для первого образца коэффициент поглощения уменьшается с увеличением влажности. У второго и третьего образцов наблюдается сначала возрастание коэффициента поглощения при увеличении влажности, а затем его снижение, что связано с различием физико-химических свойств сапропелей. При разбавлении суспензии сапропеля водой в ней образуются мельчайшие пузырьки воздуха, которые затем выделяются при отстаивании. Все образцы сапропеля выдерживались в течение одного и того же времени. Сила сцепления пузырьков воздуха с частицами сапропелей различных видов неодинаковая. В первом образце время отстаивания было достаточным для выделения образовавшихся пузырьков воздуха, поэтому коэффициент

поглощения с увеличением влажности снижается. Для второго и третьего образцов значения сначала повышаются (см. табл. 1) из-за загазованности суспензии, а при дальнейшем возрастании влажности уменьшаются.

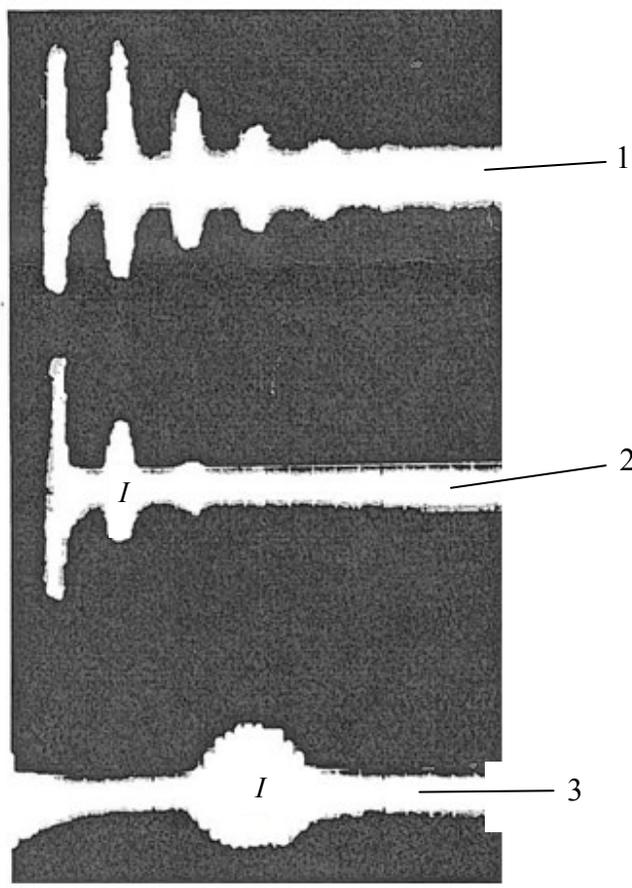


Рис. 2. Изменение волновой картины при отражении: 1 – от свободной поверхности воды; 2 – от образца сапропеля на частоте 15 кГц; 3 – первый отраженный импульс от образца сапропеля (метки времени – через 0,8 с)

Экспериментально установлены зависимости коэффициентов отражения и поглощения от частоты заполнения упругих колебаний в импульсе. В табл. 2 приведены результаты этих опытов, по которым построены зависимости коэффициентов отражения и поглощения от частоты (рис. 3). Опытные точки хорошо укладываются на кривые, проходящие через максимум для коэффициента отражения и минимум для коэффициента поглощения. Наблюдается явление квазирезонанса на частотах 8–13 кГц для всех изученных образцов сапропеля.

Экспериментальные исследования процессов волнового движения в материалах сопровождаются дисперсионными явлениями; данные явления обуславливаются геометрической формой и размерами волновода, физико-механическими свойствами материала. Основные виды физико-механической дисперсии – релаксационная, температурная и резонансная [5].

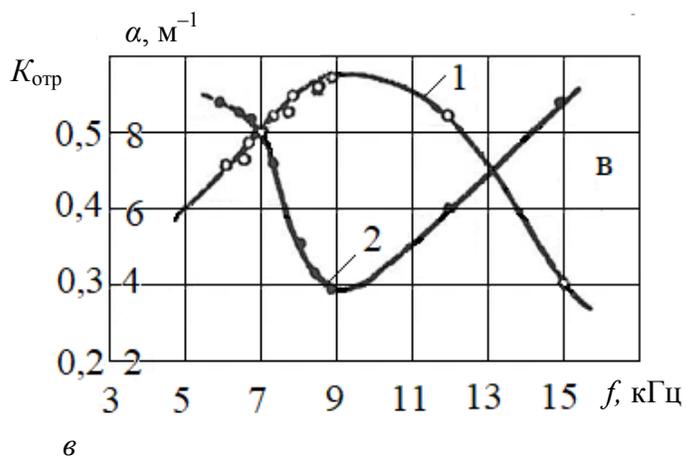
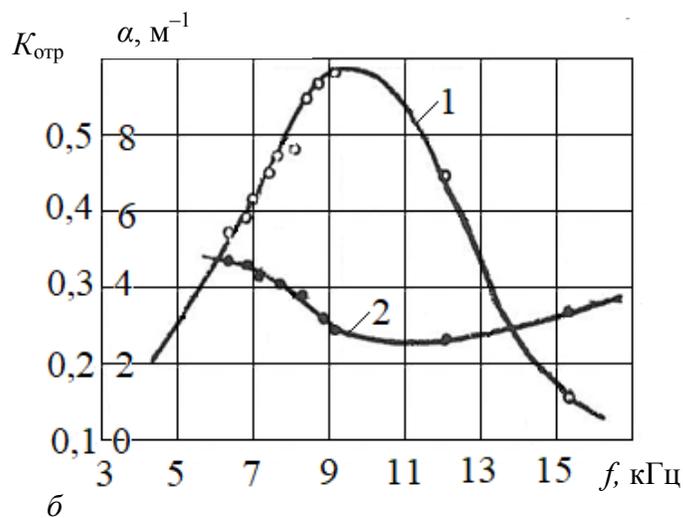
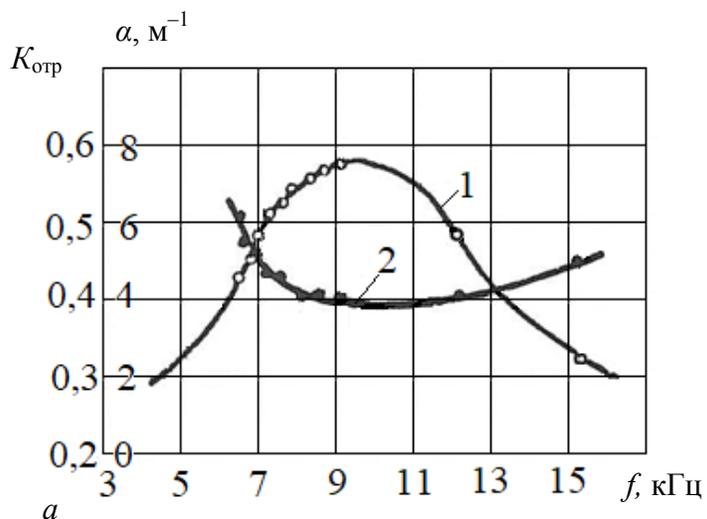


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения (1) и поглощения (2) от частоты у сапропеля: *а* – известкового; *б* – глинисто-зоогенового; *в* – песчано-зоогенового

В основе релаксационной дисперсии лежит процесс установления статистического равновесия системы, который требует определенных временных затрат. Это обусловлено соотношением времени процесса и времени релаксации системы:

$$y = y_0 e^{-t/\tau},$$

где y_0 и y – начальное и конечное значения релаксирующего показателя (деформации или напряжения); t – время процесса (период колебаний); τ – время релаксации системы.

Время релаксации определяется физико-механическими свойствами и для большинства материалов не является величиной постоянной. Во многих материалах наблюдается спектр времен релаксации.

Аналогичные явления лежат в основе температурной дисперсии, которая обусловлена изменениями условий обмена энергии между областями сжатия и разрежения. Однако результаты температурной дисперсии часто оказываются противоположными релаксационной.

Резонансная дисперсия наблюдается в материалах, которые содержат в себе включения в виде резонаторов, физико-механические свойства которых значительно отличаются от свойств окружающей среды. В максимуме такая дисперсия наблюдается при совпадении частотной характеристики волн с собственной частотой резонаторов. В реальных материалах резонансная дисперсия может выражаться в широком спектре частот из-за структурных микро- и макронеоднородностей.

Модель сапропеля как колебательной системы должна отражать всевозможные комбинации последовательно-параллельного соединения составных элементов, которые моделируют упругие H , вязкие, инерционные γ , пластические и структурные свойства, а также свойства сухого трения.

При малых деформациях и напряжениях вязкостные, пластические свойства и сухое трение проявляются незначительно, поэтому для анализа прохождения упругого импульса через сапропель достаточно проанализировать элементы модели ($\gamma + H$). Решению поставленной задачи вполне удовлетворяет дифференциальное рассмотрение работы элементов модели при прохождении через них упругих импульсов. Анализ работы элементов в волновом движении может быть сведен к решению задачи по определению деформации системы ($\gamma + H$), так как ее изменение во времени отражает форму зондирующего импульса после прохождения через упомянутые выше элементы модели [6].

Если зондирующий импульс представляет собой отрезок синусоиды, то для случая, когда $t \leq a$ (a – длительность импульса), выражение для деформации системы ($\gamma + H$) имеет вид

$$Y = \frac{P}{\gamma(\omega^2 - k^2)} \cdot \left(\sin kt - \frac{k}{\omega} \sin \omega t \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при совпадении частоты зондирующего импульса ω с частотой системы k наступает условие резонанса, что приводит к поглощению волны (нагреву образца).

Собственная частота сапропеля как колебательной системы

$$k = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (5)$$

где K – условная жесткость упругих связей, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$; m – масса частицы сапропеля, кг.

Размер частицы сапропеля непостоянен даже для одного его вида. Согласно результатам исследований М.П. Воляровича и В.Н. Тропина [7], сапропели являются полидисперсными системами. На кривой распределения частиц для сапропелей многих видов по размерам имеется два максимума (рис. 4). Первый располагается в интервале размеров частиц с эффективным радиусом 0,5–2,5 мкм, второй, более выраженный, – в интервале размеров частиц с радиусом 25–125 мкм. Форма более 90 % частиц высокодисперсных фракций сапропелей округлая и овальная. Плотность скелета сапропеля составляет 1,5–1,6 $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$, масса частицы сапропеля основной фракции – $1,3 \cdot 10^{-8}$ кг.

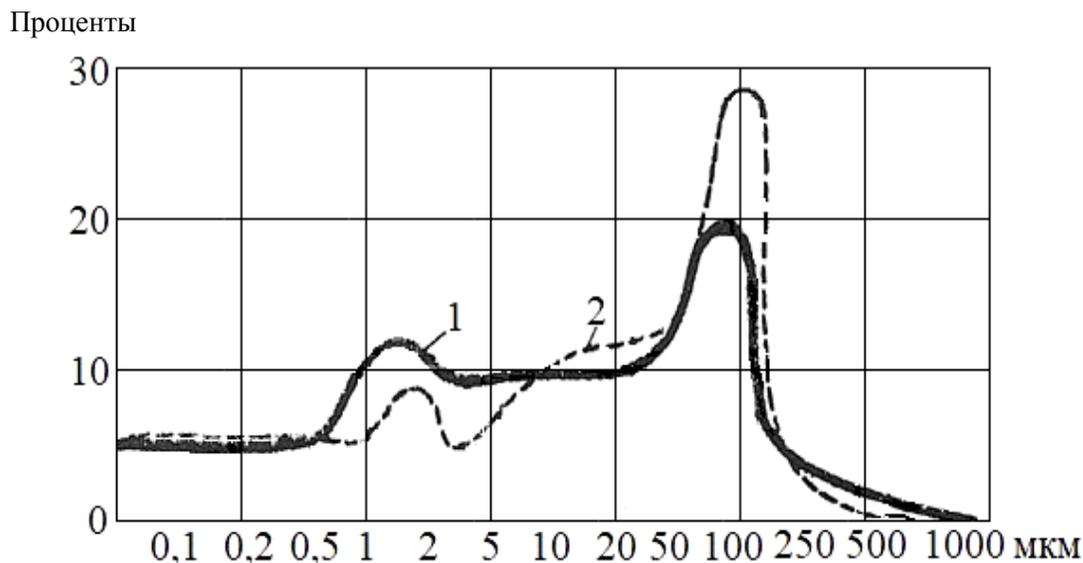


Рис. 4. Кривые распределения частиц сапропеля по размерам:
1 – водорослевый сапропель; 2 – глинисто-известковый

Условный коэффициент жесткости связей частиц сапропеля можно определить из соотношения

$$K = E \cdot \frac{S}{L},$$

где E – модуль объемной упругости, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$; S – эффективное сечение зоны взаимодействия частиц, м^2 ; L – длина образца, м.

Частица сапропеля имеет шарообразную форму с некоторым эффективным диаметром. Воспользуемся соотношением теории Герца, по которой силу взаимодействия частиц сапропеля можно определить следующим образом:

$$P = m \cdot W,$$

где m – масса частицы сапропеля, кг; $W = A \cdot \omega^2$ – ускорение частицы в колебательном движении (ω – циклическая частота колебаний; $A = d \cdot U$ – амплитуда колебаний, м; d – пьезомодуль материала датчика (для сегнетовой соли $8 \cdot 10^{-12}$ м/В); U – напряжение, приложенное к датчику, $U = 300$ В).

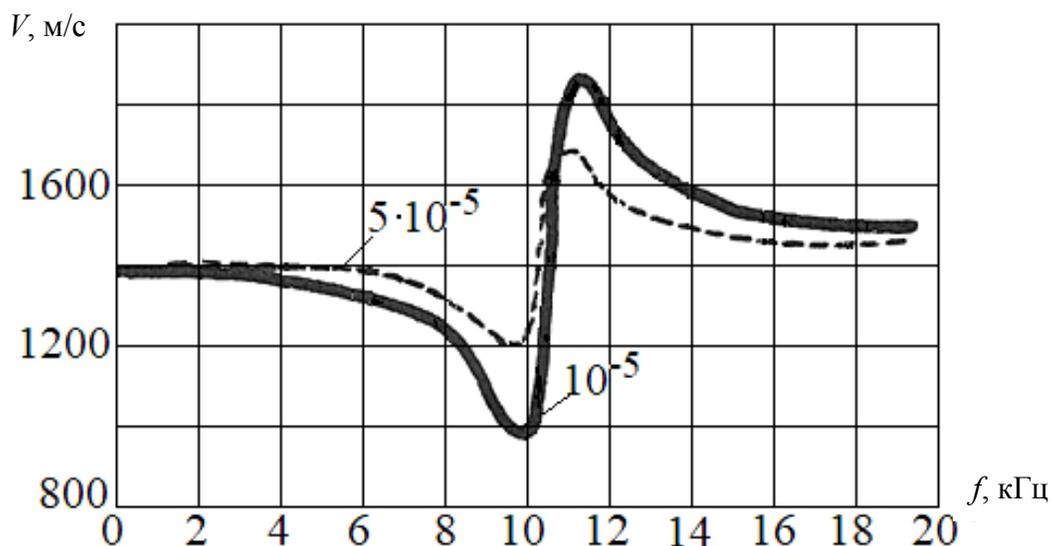
Площадь эффективного сечения зоны взаимодействия частиц сапропеля (площадь контакта)

$$S = \pi a^2 = \pi \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3m \cdot A \omega^2 r}{4E_{ст}}\right)^2} = 2,2 \cdot 10^{-10} (\text{м}^2)$$

(здесь a – радиус эффективного сечения; r – размер частицы сапропеля; $E_{ст}$ – статический модуль упругости), а условный коэффициент жесткости связей, приведенный к длине исследуемого образца, $K_{ж} = 1,75$ Н/м.

Собственная частота колебаний системы, вычисленная по формуле (5), составит 11,6 кГц, то есть будет того же порядка, при котором отмечается максимум на рис. 3. Это свидетельствует о том, что результаты расчета находятся в согласии с экспериментальными данными и коэффициент отражения звуковой волны от образца сапропеля возрастает вследствие резонансной дисперсии скорости распространения упругих колебаний.

Дисперсия скорости может наблюдаться также благодаря присутствию в образцах сапропеля воздушных пузырьков, которые способны пульсировать в жидкости с определенной частотой [5]. На резонансной частоте коэффициент поглощения проходит через максимум (рис. 5), а затем быстро уменьшается при отклонении от резонансной частоты.



a

Рис. 5. Зависимость: *a* – фазовой скорости V звука; *b* – коэффициента поглощения α в воде, содержащей газы пузырьки с собственной частотой пульсации 10 кГц, от частоты f

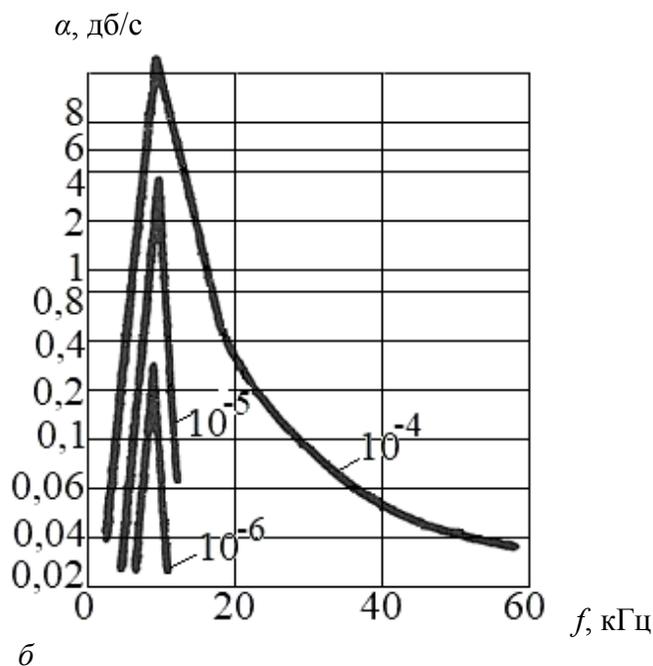


Рис. 5. Продолжение

Фазовая скорость звука значительно увеличивается на частотах, которые несколько больше резонансных, так как изменения объема пузырьков и звукового давления в них при этих частотах происходят несинфазно. Если давление возрастает, то сжимаемость воды, содержащей пузырьки, уменьшается. При содержании пузырьков различных размеров фазовые скорости звука были 2500 м/с и выше. Полученные зависимости коэффициента отражения от образцов сапропеля и коэффициента поглощения в них колебаний можно объяснить присутствием в этих образцах пузырьков воздуха с собственной частотой, несколько меньше той, что соответствует максимуму коэффициента отражения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, дисперсия скорости распространения звука в образцах сапропеля и изменение его акустических свойств в интервале частот 8–13 кГц вызывается различными физическими причинами, возникающими из-за непостоянства физико-механических свойств сапропеля при воздействии внешних нагрузок.

На характер волнового движения в сапропелях значительно влияет резонансная дисперсия скорости звука, обусловленная включением резонаторов в виде твердых частиц сапропеля или газовых пузырьков, образующихся в результате процессов диагенеза. В ходе этих процессов органическое вещество, разлагаясь, частично переходит в газы (CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2 , CH_4).

Итоги проведенных исследований, изложенные в настоящей работе, могут быть использованы при разработке практических рекомендаций по исследованию сапропелевых месторождений и позволяют найти ответы на многие актуальные вопросы, касающиеся состава этих месторождений (в том числе о насыщенности влагой, загазованности), разделения на слои, условий формирования и объемов их залежей, а также помогают с выбором параметров звуколокационной аппаратуры и расшифровкой результатов полевых эхограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко Г.Л. Прогнозная оценка качественных характеристик месторождений сапропеля водно-эрозионных озер методом звуковой геолокации // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 3. С. 114–117.
2. Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Исследование изменения спектрального состава упругого импульса при отражении и прохождении через сапропель // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 97–105.
3. Гамаюнов Н.И., Косов В.И., Иванов Г.Н. Геофизические методы изучения торфа, сапропеля и их месторождений: монография. Тверь: ТГТУ, 2002. 156 с.
4. Левин А.С., Мирандов В.Л. Сейсмоакустические методы в морских инженерно-геологических изысканиях. М.: Транспорт, 1977. 176 с.
5. Иванов Г.Н. Изучение сапропелевых отложений сейсмоакустическими методами. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Калинин, 1978. 202 с.
6. Калинин А.В., Калинин В.В., Азими Ш.А. Метод приближенной оценки искажения упругих импульсов при распространении в поглощающей среде // *Геофизические исследования*. Вып. II. М.: МГУ, 1966. С. 50–57.
7. Воларович М.П., Тропин В.Н. Исследование степени дисперсности сапропелей при помощи седиментометра и электронного микроскопа // *Коллоидный журнал*. 1958. Т. 20. Вып. I. С. 13–19.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Григорий Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры горного дела, природообустройства и промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

КРИВЕНКО Ирина Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

СМИРНОВА Марина Анатольевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mar-smir@yandex.ru

ИСПИРЯН Светлана Рафаиловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Определение коэффициентов поглощения в сапропеле и отражения на границе вода – сапропель с помощью гидроакустической трубы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 88–101.

**DETERMINATION OF ABSORPTION COEFFICIENT IN SAPROPEL
AND REFLECTION COEFFICIENT
AT THE WATER-SAPROPEL BOUNDARY USING SONAR TUBE**

G.N. Ivanov, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, S.R. Ispiryayn
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that the qualitative characteristics of sapropels (humidity, density, ash content), as well as gas contamination affect their acoustic properties, which must be taken into account when studying sapropel deposits using the sonar method. The results of sapropel studies implemented on a sonar tube are presented. It is indicated that the choice of sound frequencies of sapropel samples is related to the pipe parameters. Samples of sapropels from lakes of the Tver, Vladimir and Ryazan regions, differing in the conditions of formation of bottom sediments and the main characteristics, were used for research. It has been demonstrated that an increase in the humidity of sapropels leads to a decrease in the reflection coefficient of the sound wave. Based on measurements of the reflection coefficients at the sapropel-water boundary and the absorption coefficients of sapropels, which differ in humidity and density, conclusions are drawn about their composition, physico-mechanical properties and impact on the quality of sonar imaging.

Keywords: sapropel, sonar, sonar tube, absorption coefficient, reflection coefficient, frequency, sound velocity dispersion, sounding pulse.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

IVANOV Grigory Nikolaevich – Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining, Environmental Management and Industrial Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

KRIVENKO Irina Valer'ena – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

SMIRNOVA Marina Anatol'evna – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mar-smir@yandex.ru

ISPIRYAN Svetlana Rafailovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryayn S.R. Determination of absorption coefficient in sapropel and reflection coefficient at the water-sapropel boundary using sonar tube // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 88–101.

**Вестник Тверского государственного технического университета. Серия
«Строительство. Электротехника и химические технологии»**

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической
университет»

Адрес редакции: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22

Тел. редакции: +7 (4822) 78-89-00. **E-mail:** common@tstu.tver.ru

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Ответственный секретарь

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

Алиферов А.И. – д.т.н., профессор НГТУ

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Березовский Н.И. – д.т.н., профессор Белорусского национального технического
университета, г. Минск, Республика Беларусь

Болотов А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Бронштейн Л.М. – к.х.н., с.н.с., химический факультет Индианского универси-
тета, г. Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Колесников А.С. – к.т.н., профессор Южно-Казахстанского университета
им. М. Ауэзова, г. Чимкент, Республика Казахстан

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Макаров А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Матар П.Ю. – к.т.н., HDR, профессор Ливанского университета, г. Бейрут, Ливан

Матвеева В.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Назарова М.Ю. – д.т.н., профессор НИУ БелГУ

Петропавловская В.Б. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Самченко С.В. – д.т.н., профессор НИУ МГСУ

Севостьянов А.А. – к.т.н., доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Строкова В.В. – д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

Сульман М.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

Чернышева Н.В. – д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

Шифрина З.Б. – д.х.н., зав. лабораторией макромолекулярной химии, Институт
элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

Федюк Р.С. – д.т.н., доцент Дальневосточного федерального университета

Ясинская Н.Н. – д.т.н., доцент Витебского государственного технологического
университета, г. Витебск, Республика Беларусь