

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-65-74
УДК 539.422:678.7

П.А. Додонов, Н.Н. Федонюк 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ И СОСТАВА МИКРОСФЕР НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СФЕРОПЛАСТИКА ПРИ ДЕЙСТВИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ (МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ)

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является полимерный композиционный материал типа сферопластика (СФП), который представляет собой гетерогенную среду, состоящую из полимерной матрицы, наполненной сферическими включениями – микросферами. Цель работы заключается в повышении удельной гидростатической прочности СФП на основе анализа процессов, проходящих на уровне микроструктуры материала, что позволило выявить влияние характеристик исходных компонентов – микросфер и полимерной матрицы, на его плотность и предельное состояние.

Материалы и методы. Исходными данными являлись состав и структура СФП и характеристики его компонентов. Численные исследования проводились с использованием разработанной ранее структурной модели деформирования и разрушения СФП, реализованной в виде вычислительной программы на языке C⁺⁺.

Основные результаты. Показано влияние упругих и прочностных характеристик матрицы и стекла микросфер на плотность и прочность СФП. На основе исследований гранулометрического состава микросфер и его влияния на эти характеристики сформулированы рекомендации по разработке бидисперсной смеси микросфер марки МС-ВП. Применение такой смеси позволило создать новый СФП, обладающий требуемыми характеристиками по плотности и прочности.

Закключение. Разработанный численный метод прогнозирования характеристик СФП учитывает влияние размерных распределений в структуре микросфер и позволяет оптимизировать процесс создания новых материалов. Полученные на основе разработанных рекомендаций характеристики нового материала подтверждены результатами экспериментов.

Ключевые слова: сферопластик, микросферы, полимерная матрица, гранулометрический состав, гидростатическая прочность, плавучесть.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-65-74
UDC 539.422:678.7

P.A. Dodonov, N.N. Fedonyuk 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF MICRO SPHERE PROPERTIES AND COMPOSITION ON SYNTACTIC CHARACTERISTICS UNDER HYDROSTATIC PRESSURE (MODELING AND EXPERIMENT)

Object and purpose of research. The object of research is a polymer composite material of syntactic type, which is a heterogeneous medium consisting of a polymer matrix filled with spherical inclusions – micro spheres. The purpose of work is to increase the strength/weight ratio of syntactic under hydrostatic pressure based on the analysis of processes at the material

Для цитирования: Додонов П.А., Федонюк Н.Н. Исследование влияния свойств и состава микросфер на характеристики сферопластика при действии гидростатического давления (моделирование и эксперимент). Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 4(402): 65–74.

For citations: Dodonov P.A., Fedonyuk N.N. Investigation into the influence of micro sphere properties and composition on syntactic characteristics under hydrostatic pressure (modeling and experiment). Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 65–74 (in Russian).

micro structure level, which let us identify the influence of initial components (micro spheres) and polymer matrix on the material density and ultimate state.

Materials and methods. The Initial data are syntactic composition and structure as well as characteristics of its components. Numerical studies were performed using the earlier developed structural model of syntactic deformation and failure implemented into C++ software.

Main results. The elastic and strength characteristics of the matrix and micro sphere glass are shown to have influence on the syntactic density and strength. Based on the size distribution of micro spheres and its influence on these characteristics, recommendations are formulated regarding development of the bi-dispersed mixture of MS-BP micro spheres. Application of such mixture made it possible to develop a new syntactic foam with required density and strength characteristics.

Conclusion. The newly developed numerical method for prediction of syntactic characteristics takes into consideration the size distribution in micro sphere structures and allows optimized development of novel materials. The characteristics of new material obtained on the basis of developed guidelines have been verified by experiments.

Keywords: syntactic material, polymer matrix, size distribution, hydrostatic strength, buoyancy.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Сферопластик (СФП) представляет собой гетерогенный материал, состоящий из плотно упакованных полых стеклянных микросфер, расположенных в полимерной матрице. Основное назначение этого материала заключается в обеспечении плавучести глубоководной техники [1–3]. Под действием гидростатического давления сравнительно высокого уровня в его структуре происходят необратимые изменения, связанные с деформациями матрицы и микросфер и с их постепенным разрушением. Такой характер развития процесса накопления повреждений и сопутствующего ему процесса водопоглощения подтверждается результатами экспериментальных исследований [4] и численного моделирования [5].

На плотность и прочность СФП и, следовательно, его плавучесть и долговечность влияют харак-

теристики микросфер и матрицы, а также технологии изготовления из них материала. При условии отработанности технологии исследование влияния этих характеристик на состояние материала является важной практической задачей. Ее решение позволит определить пути улучшения качества СФП и тем самым спрогнозировать характеристики вновь создаваемого материала, учитывая свойства исходных компонентов – микросфер и матрицы. На основе результатов можно определить направления улучшения свойств исходных компонентов исходя из требований, предъявляемых к СФП, и сформулировать рекомендации по их реализации.

Настоящая работа посвящена решению перечисленных вопросов на основе результатов численного моделирования, которое проводилось с помощью программного обеспечения разработанной структурной модели деформирования и разрушения СФП [5]. Итогом исследований стали разработка рекомендаций и изготовление бидисперсной смеси микросфер марки МС-ВП, на основе которой был создан новый СФП, обладающий требуемыми характеристиками по плотности и прочности. Полученные расчетные величины указанных характеристик подтверждены результатами испытаний образцов этого материала при действии гидростатического давления.

Влияние характеристик микросфер и матрицы на плотность и прочность СФП

Effect of micro sphere and matrix characteristics on syntactic density and strength

Численные исследования были проведены на базе СФП, выполненного на основе микросфер марки МС-ВП плотностью $0,304 \text{ г/см}^3$, гистограмма распределения которых по диаметрам показана на рис. 1.

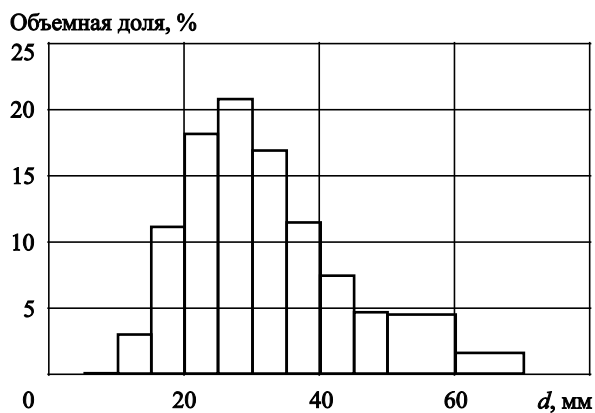


Рис. 1. Гистограмма распределения относительного объемного количества микросфер марки МС-ВП по диаметрам

Fig. 1. Bar graph of volume fractions of MS-VP micro spheres by diameters

Таблица 1. Характеристики материалов микросфер и полимерной матрицы

Table 1. Micro sphere and matrix material characteristics

Наименование характеристики и ее размерность	Эпоксидное связующее	Натрийборосиликатное стекло
Плотность, кг/м ³	1140	2600
Модуль упругости, ГПа	4,68	65,0
Объемный модуль упругости, ГПа	5,2	–
Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	177,5	3000
Коэффициент Пуассона	0,35	0,20

Свойства стекла микросфер и эпоксидного связующего матрицы приведены в табл. 1. Все расчеты проводились при коэффициенте заполнения объема (КЗО) $\lambda_s = 62\%$.

Для исследования влияния характеристик исходных компонентов вначале были изменены характеристики стекла микросфер, которые приняли следующими: $E_g = 75$ ГПа, $\sigma_{c(g)}^R = 3,5$ ГПа, $E_g = 80$ ГПа, $\sigma_{c(g)}^R = 4,5$ ГПа, где E_g – модуль нормальной упругости, $\sigma_{c(g)}^R$ – предел прочности на сжатие. При этом свойства связующего оставались без изменения. На следующем этапе был изменен модуль нормальной упругости связующего $E_m = 3,0$ ГПа, $5,9$ ГПа. Остальные характеристики связующего и стекла микросфер остались прежними и соответствовали табл. 1.

Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3.

Из полученных результатов видно, что микросферы играют определяющую роль в улучшении качеств СФП. Так, повышение модуля нормальной упругости стекла микросфер на 23 % увеличивает объемный модуль упругости СФП на 15 % (рис. 2а), а увеличение прочности стекла на 50 % приводит к росту гидростатической прочности материала на 32 % (рис. 2б). Упругие свойства матрицы практически не повлияли на прочность СФП, что и следовало ожидать. При этом объемный модуль СФП увеличился более чем на 20 %, что приводит к меньшему снижению силы плавучести на глубине (рис. 3).

Повышение характеристик стекла связано с проведением большого объема сложных исследований по поиску его новой рецептуры и ее промышленного освоения, что в свою очередь потребует разработки новой технологии формования из такого стекла микросфер. Поэтому исследовался другой путь улучшения характеристик СФП – с помощью изменения гранулометрического состава микросфер, т.е. диаметра

и плотности микросфер по фракциям по определенным законам. Реализация этого пути возможна на базе выпускаемых в настоящее время НПО «Стеклопластик» микросфер марки МС-ВП,

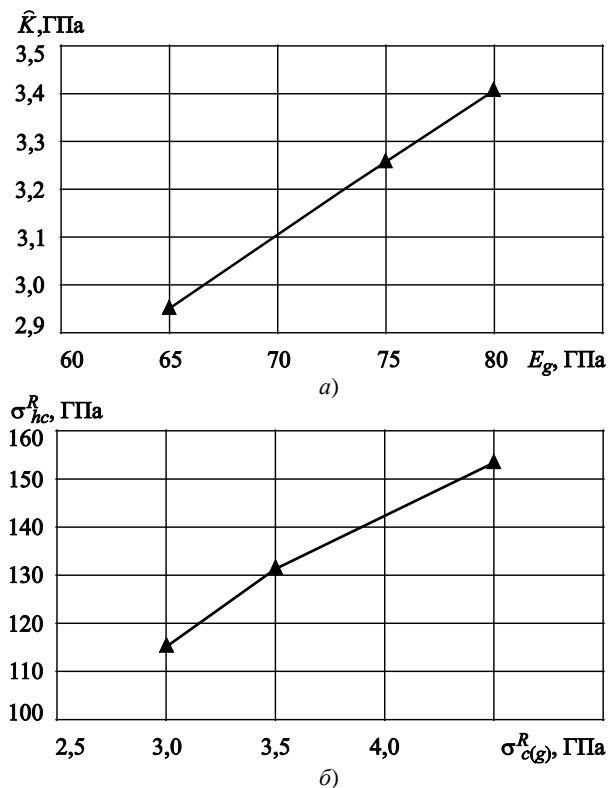


Рис. 2. Зависимости объемного модуля упругости \hat{K} (а) и гидростатической прочности σ_{hc}^R (б) сферопластика от модуля нормальной упругости E_g и прочности на сжатие $\sigma_{c(g)}^R$ стекла микросфер соответственно

Fig. 2. Syntactic volume modulus of elasticity \hat{K} (a) and hydrostatic strength σ_{hc}^R (b) versus modulus of elasticity E_g and compressive strength $\sigma_{c(g)}^R$ of micro sphere glass, respectively

используя методы отбраковки и фракционирования, что не вызывает значительных технологических трудностей.

Модель единой плотности

Model of integrated density

Изменение плотности микросфер влияет на характеристики СФП по-разному. Если изменить среднюю плотность микросфер в партии, оставив прежней гистограмму их распределения по диаметрам, что можно сделать за счет изменения толщины их стенок, то можно получить картину, представлен-

ную на рис. 4. Из нее видно, что увеличение средней плотности микросфер почти на 26 % приводит к повышению гидростатической прочности сферопластика на 30 %, а его плотности – на 7,8 %. Увеличение плотности негативно сказывается на плавучести материала, поэтому основной проблемой при создании нового СФП является поиск компромисса между снижением его плотности и повышением гидростатической прочности.

Если сохранить среднюю плотность микросфер в партии на том же уровне, то, меняя плотности микросфер в отдельных фракциях, можно получить увеличение их средней плотности и, соответственно, прочности СФП.

В соответствии с механизмом развития повреждений в материале, при действии гидростатического давления начинают разрушаться «наиболее слабые» микросферы больших диаметров, имеющие наименьшую плотность, прежде всего расположенные вблизи наружной поверхности [5]. Если повысить плотность этих микросфер и, следовательно, их прочность, то можно получить увеличение прочности СФП. При этом плотность микросфер сравнительно малых диаметров, наиболее прочных, можно снизить, чтобы средняя плотность партии микросфер не изменилась.

Для иллюстрации сказанного была рассмотрена модельная задача, где изменены плотность и, соответственно, толщины стенок микросфер марки МС-ВП по фракциям с сохранением средней плотности на уровне 0,300 г/см³ и гистограммы их распределения по диаметрам (рис. 1). Результаты этих преобразований представлены на рис. 5 (см. вклейку).

Для оценки влияния изменения толщины стенок микросфер и их плотности по фракциям был произведен расчет 10%-й прочности микросфер, т.е. величины гидростатического давления, при которой разрушается 10 % микросфер по объему, для средней плотности 0,300 г/см³ (рис. 6а, см. вклейку) и в зависимости от средней плотности микросфер в партии (рис. 6б, см. вклейку).

Представленные данные показывают, что переход к модели единой плотности заметно меняет характер зависимости объема разрушенных микросфер от величины действующего давления, из которой следует, что 10%-я прочность увеличивается почти в 1,5 раза. Также можно отметить, что экспериментальные значения прочности микросфер достаточно хорошо коррелируются с соответствующими расчетными зависимостями, полученными для исходного распределения микросфер по фракциям.

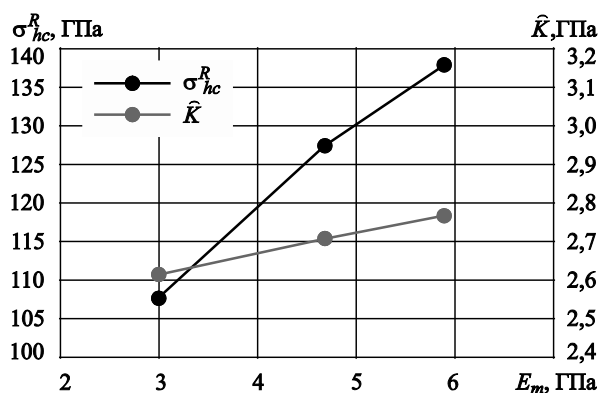


Рис. 3. Зависимости объемного модуля упругости \hat{K} и гидростатической прочности σ_{nc}^R сферопластика от модуля нормальной упругости E_m связующего матрицы

Fig. 3. Syntactic volume modulus of elasticity \hat{K} and hydrostatic strength σ_{nc}^R versus modulus of elasticity E_m of matrix binder

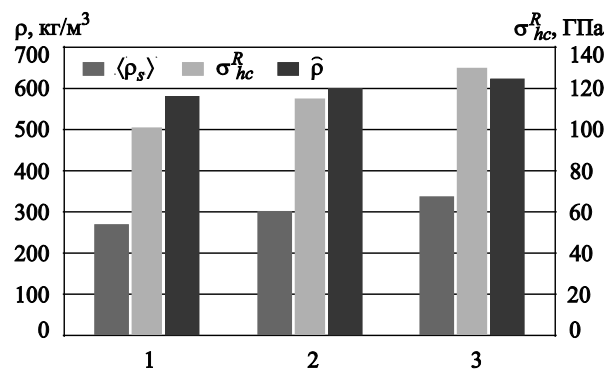


Рис. 4. Диаграммы, показывающие зависимости гидростатической прочности σ_{nc}^R сферопластика и его плотности $\hat{\rho}$ от средней плотности микросфер $\langle \rho_s \rangle$

Fig. 4. Diagrams showing syntactic hydrostatic strength σ_{nc}^R and density $\hat{\rho}$ versus average density of micro spheres $\langle \rho_s \rangle$

Повышение прочности микросфер естественным образом приводит к увеличению гидростатической прочности СФП. При переходе к модели единой плотности также меняется характер деформирования и разрушения материала при действии гидростатического давления (рис. 7, см. вклейку).

Из этих диаграмм видно, что в модели с исходным распределением микросфер по диаметрам относительно большие и менее прочные микросферы начинают разрушаться при подъеме давления до 50 МПа и выше, т.е. задолго до полной потери материалом прочности и плавучести, что подтверждает сказанное выше о механизме развития повреждений в СФП.

Модели, основанные на преобразовании гистограмм распределения микросфер

Models based on transformation of bar graphs of micro sphere distribution

Рассмотренная здесь модель изменения гранулометрического состава микросфер носит в основном теоретический характер, т.к. добиться одинаковой плотности микросфер всех фракций практически невозможно при существующей технологии их формования. Тем не менее полученные результаты показывают направление повышения гидростатической прочности СФП при возможном сохранении его плотности, что будет продемонстрировано ниже на других примерах.

Одним из альтернативных путей повышения прочности СФП может быть изменение формы гистограммы распределения микросфер по диаметрам. При изменении этой формы меняется состав микросфер, т.е. их диаметры и относительное объемное или массовое соотношение между ними. Изменение их диаметров приводит, как было показано выше, к изменению плотности и прочности микросфер по фракциям.

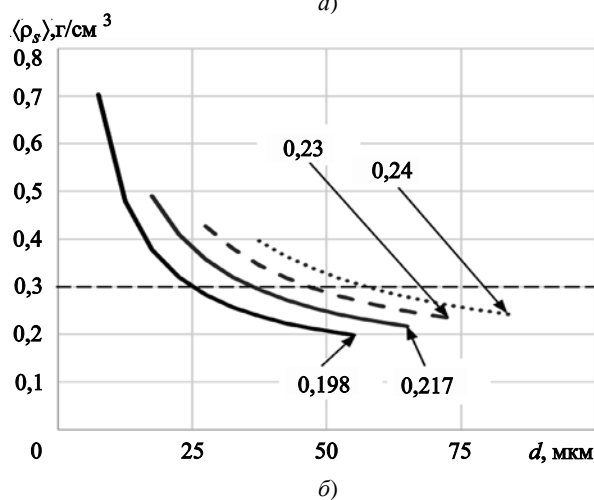
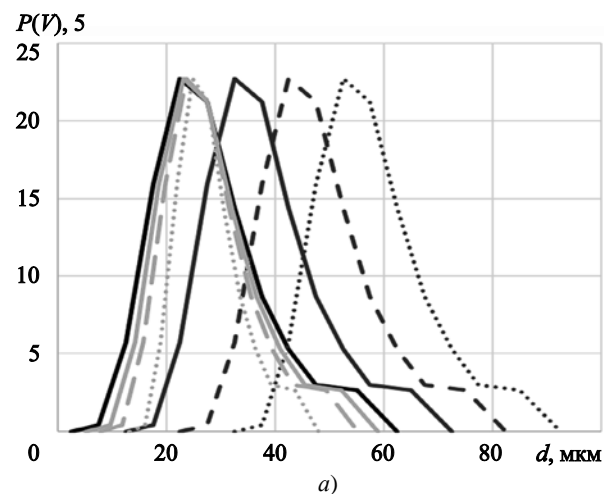
Рассмотрены две модели преобразования гистограмм:

- путем увеличения среднего диаметра микросфер, сдвигая исходную гистограмму «вправо»;
- путем приближения распределения микросфер к монодисперсному за счет «сужения» гистограммы, т.е. уменьшения диапазона изменения их диаметров.

Все преобразования проводились относительно исходной гистограммы распределения микросфер по диаметрам (рис. 1) с их средней плотностью в партии 0,300 г/см³. Чтобы поставить модели

в одинаковые условия, было принято, что при этих преобразованиях гистограмм средняя плотность микросфер находится на уровне, соответствующем исходному варианту.

В первой модели гистограмма сдвигалась «вправо» на 10, 20, 30 мкм, что приводит к увели-



— исходное распределение
 - - - средняя плотность микросфер 0,300 г/см³
 — — — сдвиг гистограммы «вправо»
 — — — «сужение» гистограммы

Рис. 8. Изменение расчетных гистограмм распределения микросфер по диаметрам (стрелчатые гистограммы представлены в виде кривых) (а) и соответствующее изменение плотности микросфер (числа указывают на минимальную плотность микросфер в г/см³) (б)

Fig. 8. Variation of bar graphs of micro sphere distribution by diameters (bar graphs are represented as curves) (a) and respective changes in micro sphere density (numbers refer to minimum micro sphere density g/cm³) (b)

чению среднего диаметра микросфер. Для сохранения средней плотности микросфер на заданном уровне толщина их стенок должна быть изменена. В результате зависимости плотности микросфер от диаметра также смещаются «вправо» относительно исходного распределения (рис. 8). При этом минимальная плотность микросфер возрастает. Так как плотность наиболее крупных микросфер возрастает, то увеличивается и их прочность. Учитывая, что крупные микросферы являются инициаторами развития повреждений в СФП, следует ожидать, что прочность материала при действии гидростатического давления также увеличится.

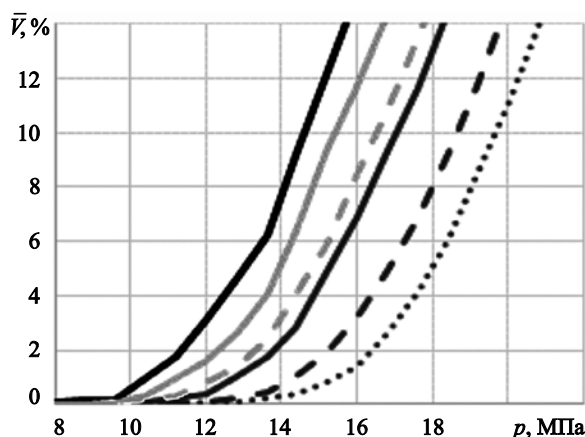


Рис. 9. Расчетные диаграммы разрушения микросфер (обозначения соответствуют рис. 8)

Fig. 9. Diagrams of damaged micro spheres (symbols according to Fig. 8)

Таблица 2. Результаты расчетов гидростатической прочности сферопластика плотностью 560 кг/м³ при преобразовании гистограмм распределения микросфер по диаметрам

Table 2. Hydrostatic strength calculations for syntactic of 560 kg/m³ density at transformation of bar graphs of micro sphere diameter distribution

Гистограмма	σ_{hc}^R , МПа
Исходная гистограмма	106,1
	111,2
Сдвиг гистограммы «вправо»	117,5
	120,1
«Сужение» гистограммы	108,3
	112,5

Во второй модели преобразование гистограммы производится путем уменьшения диапазона изменения диаметров микросфер за счет ее «сужения» последовательно на 5 и 10 мкм. В этом случае средний диаметр микросфер не меняется. Тогда зависимость плотности микросфер от их диаметра практически соответствует исходному варианту и корректировка толщины их стенок не требуется (рис. 8).

Преобразование в этих двух моделях исходной гистограммы меняет гранулометрический состав микросфер, что приводит к изменению их прочности. Кривые зависимости относительного объема разрушенных микросфер от давления, полученные в результате расчета, представлены на рис. 9. Увеличение прочности микросфер способствует повышению гидростатической прочности СФП. Результаты расчетов прочности СФП с помощью разработанного программного обеспечения указаны в табл. 2.

Рассмотренные здесь примеры преобразования гистограмм приводят к снижению максимально достижимого КЗО с $\lambda_S \approx 68,3\%$ до $\lambda_S \approx 66,5\%$. Сдвиг гистограммы «вправо» увеличивает средний диаметр микросфер d_{cp} , а «сужение» гистограммы приближает распределение микросфер к монодисперсному типу и, следовательно, должно приводить к снижению КЗО.

Сохранение средней плотности микросфер на одном уровне при практически постоянном КЗО обеспечивает сохранение плотности СФП при всех преобразованиях гистограммы. Снижение плотности СФП при повышении (или как минимум сохранении) его гидростатической прочности можно получить путем увеличения КЗО, что будет показано ниже. Также стоит отметить, что характеристика минимальной плотности микросфер (рис. 8б) хорошо коррелируется с прочностью СФП и является ее эффективным предиктором.

Модели, основанные на бидисперсном распределении микросфер по диаметрам

Models based on bi-dispersed distribution of micro spheres by diameters

Одним из возможных путей увеличения КЗО является переход к бидисперсному распределению микросфер по диаметрам, когда это распределение образовано двумя группами микросфер, которые значительно отличаются друг от друга характерными размерами, например средними диаметрами.

Для оценки возможности образования бидисперсной смеси микросфер рассмотрены три монодисперсных распределения, каждое из которых имеет микросферы одинакового диаметра (табл. 3).

При отсутствии разницы в плотности микросфер зависимости гидростатической прочности СФП от его плотности практически совпадают. Это видно на рис. 10 (см. вклейку), где результаты множества расчетов СФП на основе всех трех моделей, обобщенные в виде линейных аппроксимаций, представлены одной прямой (расчеты проводились при исходных характеристиках стекла и связующего, указанных в табл. 1).

Для подтверждения возможности повышения КЗО были образованы из трех рассмотренных выше монодисперсных распределений две бидисперсные смеси диаметров d_S-d_L из микросфер 30–60 мкм и 30–90 мкм, варьируя внутри каждой пары объемное соотношение между ними.

Результаты расчетов моделей СФП с этими бидисперсными смесями микросфер, проиллюстрированные на рис. 10, показали, что путем комбинации микросфер двух размеров и изменения пропорции между ними можно получить максимальный КЗО и, соответственно, снизить плотность материала. Очевидно, что чем больше разница между диаметрами микросфер в бидисперсной смеси, тем больший максимальный КЗО может быть достигнут. Наибольший эффект достигается при смешении микросфер с соотношением диаметров 1 к 3. В этом случае получены максимальный КЗО, равный $\lambda_S \approx 72,4\%$, и минимальная плотность СФП $\bar{\rho} \approx 530 \text{ кг/м}^3$. Естественно, что гидростатическая прочность также приобретает наименьшее значение.

Результаты моделирования структуры сферопластика с улучшенными характеристиками

Results of modeling the syntactic structure with better characteristics

Основная задача при создании нового СФП, предназначенного для применения в системах плавучести глубоководной техники, заключается, как говорилось выше, в максимально возможном снижении его плотности при обеспечении требуемой гидростатической прочности. Это и является предметом поиска оптимальной структуры мате-

Таблица 3. Характеристики моделей с монодисперсным распределением

Table 3. Characteristics of models with mono-dispersed distribution

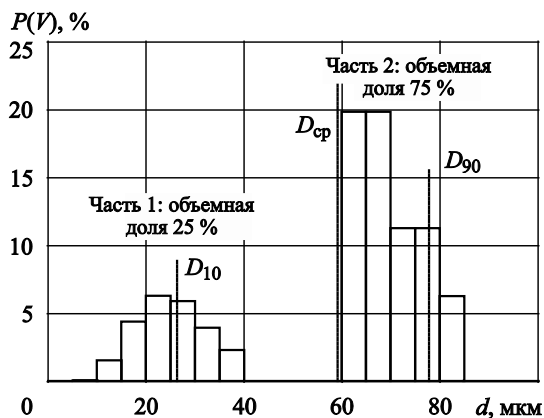
Модель	Диаметры микросфер, мкм	Средняя плотность микросфер $\langle \rho_s \rangle$, г/см ³	Max λ_S , %
№ 1	30		
№ 2	60	0,30	~66,5
№ 3	90		

риала. Однако, как показали результаты проведенных исследований, между прочностью и плотностью наблюдается практически линейная зависимость, и, уменьшая плотность материала, получаем снижение его прочности.

Возможные пути решения этой задачи были рассмотрены выше на моделях изменения гранулометрического состава микросфер и его влияния на характеристики СФП. Анализ результатов исследований на этих моделях показывает, что переход к бидисперсной смеси микросфер и сближение плотностей микросфер по фракциям позволяют увеличить КЗО и, следовательно, снизить плотность, сохраняя при этом прочность. Этот эффект был получен в предыдущем исследовании на моделях бидисперсной смеси, составленной из двух монодисперсных распределений «больших» d_L и «малых» d_S микросфер.

Однако в реальных условиях бидисперсная смесь составляется из полидисперсных распределений микросфер, каждое из которых характеризуется своей гистограммой. В этом случае для описания распределения микросфер вместо их диаметров d_L и d_S вводятся характерные диаметры D_{10} , D_{90} и D_{cp} , которые указываются в технической документации на микросферы: D_{10} , D_{90} – диаметры, микросферы меньше которых составляют 10 % и 90 % объема соответственно, D_{cp} – средний диаметр по объемному распределению. К примеру, для исходной гистограммы распределения (рис. 1), диаметры D_{10} , D_{90} и D_{cp} соответственно равны 16,6 мкм, 41,5 мкм и 27,9 мкм.

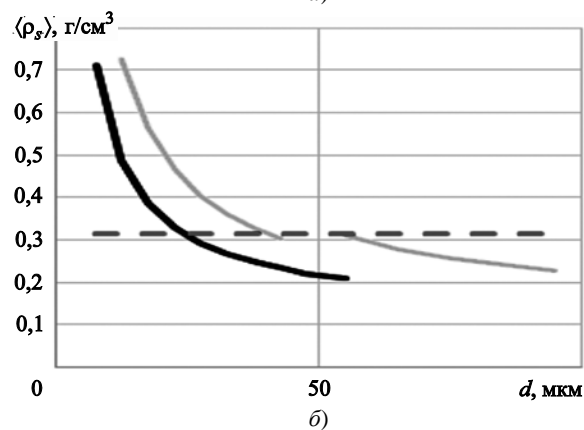
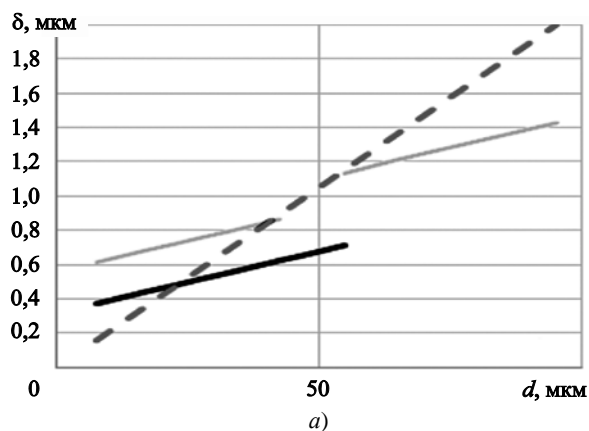
Для оценки влияния этих параметров на КЗО было рассмотрено более 40 гистограмм с разными значениями соотношений D_{cp}/D_{10} и D_{90}/D_{10} , для которых был выполнен расчет КЗО. На основании результатов этих расчетов была построена диа-



D_{10}	20,5 мкм
D_{90}	77,1 мкм
D_{cp}	59,8 мкм
D_{cp}/D_{10}	2,9
D_{90}/D_{10}	3,7
Расчетное макс. КЗО	70,4

Рис. 12. Гистограмма распределения микросфер в бидисперсной смеси с обозначением характерных диаметров и их значений

Fig. 12. Bar graph of micro sphere distribution in bi-dispersed mixture with indication of characteristic diameters and their values



— модель на основе исходной гистограммы
 - - - модель единой плотности
 - · - модель распределения плотностей в бидисперсной смеси

Рис. 13. Распределения толщин стенок (а) и плотностей (б) микросфер в зависимости от их диаметра по фракциям для трех моделей представления микросфер

Fig. 13. Distribution of micro sphere wall thickness (а) and density (b) versus their diameters in fraction for three models of micro sphere presentation

грамма в координатах « $D_{cp}/D_{10} - D_{90}/D_{10}$ ». Из этой диаграммы можно получить, что КЗО можно повысить до уровня 68 % и больше, когда соотношения между характерными диаметрами будут удовлетворять следующему условию (рис. 11, см. вклейку):

$$D_{cp}/D_{10} > D_{90}/(4D_{10}) + 1,45.$$

Используя данную диаграмму, нетрудно найти, что КЗО микросфер, распределение которых по диаметрам описывается исходной гистограммой (рис. 1), будет находиться на уровне 66 %.

Путем преобразования исходного распределения микросфер была построена модель бидисперсной смеси, состоящей из двух частей со средними диаметрами порядка 30 и 90 мкм. При этом, учитывая результаты исследований, рассмотренные выше, было принято соотношение между их объемными долями как 25/75 (рис. 12).

Полученные значения характерных диаметров, указанные в табл. к рис. 12, обеспечивают, как следует из рис. 11, достижение КЗО выше 70 %. Чтобы повысить прочность микросфер в смеси, желательно иметь их одинаковую плотность в обеих частях. Так как при существующей технологии формования микросфер это выполнить не представляется возможным, средняя плотность микросфер в части 1 была увеличена до $\sim 0,42 \text{ г/см}^3$, а в части 2 – до $\sim 0,27 \text{ г/см}^3$. Такое распределение плотностей микросфер далеко от оптимального, но позволяет получить среднюю плотность микросфер в смеси $\sim 0,300 \text{ г/см}^3$ (рис. 13).

Для полученной смеси расчетная 10%-я прочность возросла на 8 % по сравнению с прочностью микросфер исходной гистограммы при сохранении той же средней плотности. Расчет гидростатической прочности СФП на основе полученной бидисперсной смеси микросфер и эпоксидного связующего (табл. 1) с помощью разработанного про-

граммного обеспечения [5] показал, что применение бидисперсной смеси микросфер позволяет снизить плотность сферопластика практически до уровня 550 кг/м^3 и повысить его прочность почти на 3 % (рис. 14, см. вклейку).

Предлагаемая модель бидисперсной смеси микросфер реализована на практике. В соответствии с параметрами этой модели выпущены партии микросфер, относящиеся к частям 1 и 2, смешение которых в пропорции 25/75 обеспечило получение бидисперсной смеси с характеристиками, близкими к модели.

Снижение плотности материала с 560 до 550 кг/м^3 за счет увеличения КЗО позволило решить основную задачу создания материала с требуемыми характеристиками, в т.ч. обладающего необходимыми технологическими свойствами для изготовления блоков реальных размеров. Это нашло подтверждение по результатам отработки технологических режимов формования и отверждения при изготовлении образцов и блоков СФП на основе полученной бидисперсной смеси микросфер.

В результате разработан и экспериментально проверен СФП марки С-6Г, который в отличие от ранее исследованных модификаций [5] имеет плотность $550 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ и гидростатическую прочность в составе образцов не ниже 103 МПа. Гидростатические испытания образцов этого СФП подтвердили заявленные значения плотности и прочности, и, как видно из рис. 14, экспериментальные точки достаточно хорошо (с учетом статистической природы этого материала) согласуются с расчетом.

Заключение

Conclusion

Обобщая результаты исследований, можно отметить, что разработанная структурная модель деформирования и разрушения СФП дает возможность не только исследовать процессы, происходящие в материале на микроуровне, при действии гидростатического давления, но и прогнозировать характеристики вновь создаваемого материала (прочность, плотность, плавучесть) исходя из свойств исходных компонентов – микросфер и полимерной матрицы.

Эти возможности структурной модели позволяют решить обратную задачу, а именно – определить направления улучшения свойств исходных компонентов для создания СФП, удовлетворяющего заданным требованиям, и сформулировать рекомендации по реализации этих направлений.

Приведенный в настоящей работе пример разработки нового СФП с характеристиками, не имеющими аналогов в отечественной промышленности, подтвердил сказанное выше, что нашло отражение в результатах успешных испытаний образцов этого материала при действии гидростатического давления.

Список использованной литературы

1. Красникова Т.В., Петриленкова Е.Б. Пеноматериалы на основе полимерных связующих и микросфер. Ленинград : [б. и.], 1971. 23 с. (Пластмассы и их применение в промышленности / Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды).
2. Прочные корпуса и объемы плавучести глубоководных аппаратов / А.Ю. Гуськов, Ю.А. Либов, А.Е. Рыжкин, Н.Н. Федонюк // Зарубежное судостроение (1965–1988 гг.). Ленинград : ЦНИИ «Румб», 1988. № 661. 89 с.
3. Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review / L.O. Afolabi, Z.M. Ariff, S.F.S. Hashim [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9, № 5. P. 10698–10718. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.074.
4. Федонюк Н.Н., Федоров Ю.П. Водопоглощение и долговечность сферопластиков при длительном действии гидростатического давления // Вопросы материаловедения. 1995. Вып. 3. С. 74–82.
5. Федонюк Н.Н., Додонов П.А. Структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа сферопластика при действии гидростатического давления // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. Вып. 2(396). С. 37–51. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-37-51.
6. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 1. О размерах промышленных полых стеклянных микросфер / А.Н. Трофимов, Л.В. Плешков, А.В. Байков, И.В. Стогова // Пластические массы. 2020. Вып. 11–12. С. 15–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-15-19.
7. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 3. О толщине стенок промышленных полых стеклянных микросфер / А.Я. Горенберг, А.Н. Трофимов, В.Г. Иванова-Мумжиева [и др.] // Пластические массы. 2021. Вып. 3–4. С. 32–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36.

References

1. Krasnikova T.V., Petrilenkova E.B. Foam materials based on polymer binders and micro spheres. Leningrad : [b.i.], 1971. 23 p. (Plastic materials and their application in industry / Leningr. dom nauch-tekh propagandy) (in Russian).

2. Pressure hulls and buoyancy modules of deepwater submersibles / *A.Yu. Guskov, Yu.A. Libov, A.E. Ryzhkin, N.N. Fedonyuk* // *Zarubezhnoe sudostroenie (1965–1988)*. Leningrad: TsNII “Rumb”, 1988. No. 661. 89 p. (*in Russian*).
3. Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review / *L.O. Afolabi, Z.M. Ariff, S.F.S. Hashim* [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, No. 5. P. 10698–10718. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.074.
4. *Fedonyuk N.N., Fedorov Yu.P.* Water absorption and durability of syntactic foam under long-term hydrostatic pressure exposure // *Voprosy materialovedenia*. 1995. Vol. 3. P. 74–82 (*in Russian*).
5. *Fedonyuk N.N., Dodonov P.A.* Structural model of deformation and failure of heterogeneous material of syntactic type under hydrostatic pressure // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021. Vol. 2(396). P. 37–51. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-37-51 (*in Russian*).
6. Morphology and properties of hollow glass micro spheres. Part 1. On sizes of industrial hollow glass micro spheres / *A.N. Trofimov, L.V. Pleshkov, A.V. Baikov, I.V. Stogova* // *Plastic materials*. 2020. Vol. 11–12. P. 15–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-15-19 (*in Russian*).
7. Morphology and properties of hollow glass micro spheres. Part 3. On wall thickness of industrial hollow

glass micro spheres / *A.Ya. Gorenberg, A.N. Trofimov, V.G. Ivanova-Mumzhieva* [et al.] // *Plastic materials*. 2021. Vol. 3–4. P. 32–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Додонов Павел Анатольевич, инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: dodonovpavel@gmail.com.

Федонюк Николай Николаевич, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: fednik46@yahoo.com. <https://orcid.org/0000-0001-8835-8901>.

About the authors

Pavel A. Dodonov, Engineer 1st Category, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: dodonovpavel@gmail.com.
Nikolay N. Fedonyuk, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: fednik46@yahoo.com. <https://orcid.org/0000-0001-8835-8901>.

Поступила / Received: 03.03.22
Принята в печать / Accepted: 14.10.22
© Додонов П.А., Федонюк Н.Н., 2022

Рис. 5. Распределения толщин стенок микросфер (а) и их плотностей (б) в зависимости от диаметра по фракциям с указанием 95 % доверительного интервала

Fig. 5. Distribution of micro sphere wall thickness (a) and density (b) versus diameter in fractions with 95 % confidence range

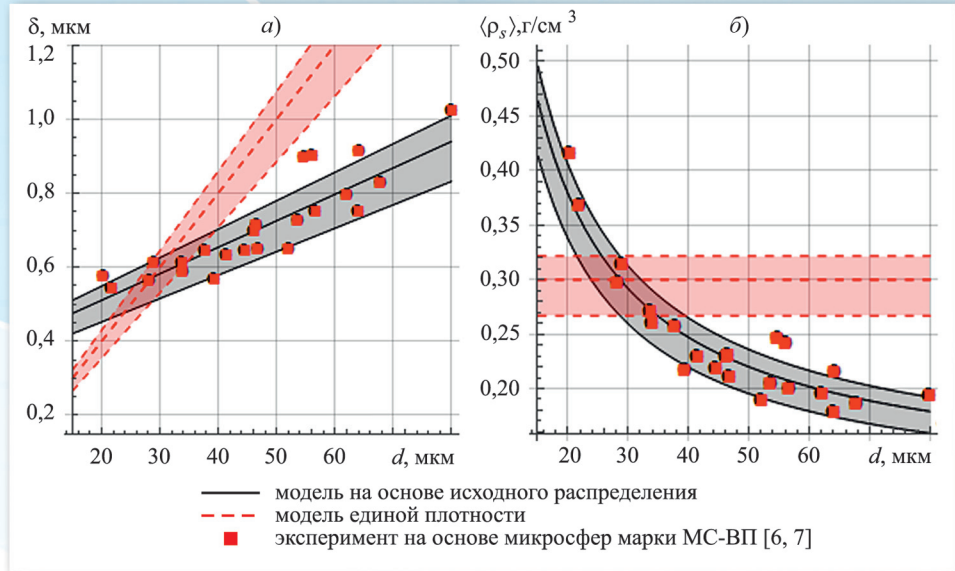


Рис. 6. Графики зависимостей объема разрушенных микросфер \bar{V} от давления p для микросфер средней плотности $0,300 \text{ г/см}^3$ и 10%-й прочности P_{10} от средней плотности микросфер в партии $\langle \rho_s \rangle$ (б)

Fig. 6. Graphs of damaged micro sphere volume \bar{V} versus pressure p for micro spheres of average density 0.300 g/cm^3 (a) and 10 % strength of P_{10} versus micro spheres of average density in a batch $\langle \rho_s \rangle$ (b)

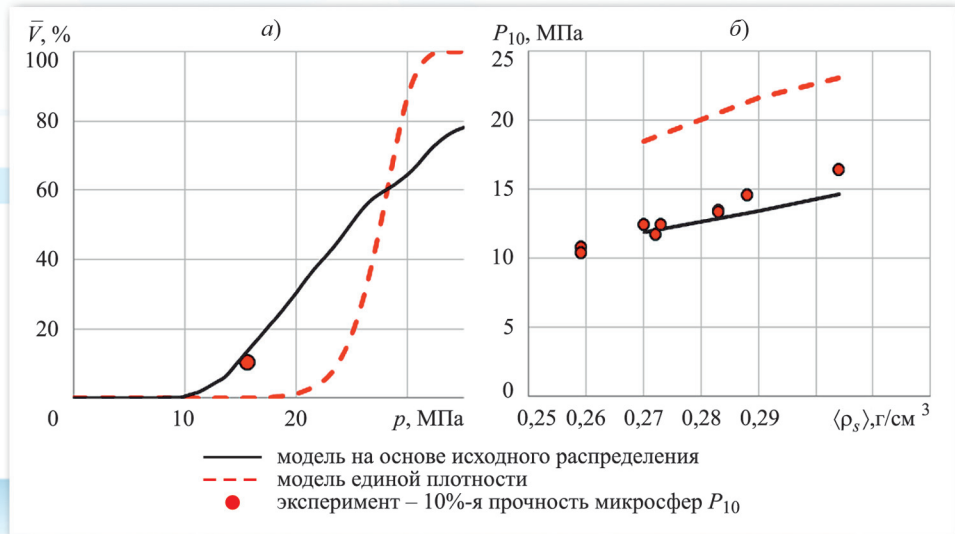
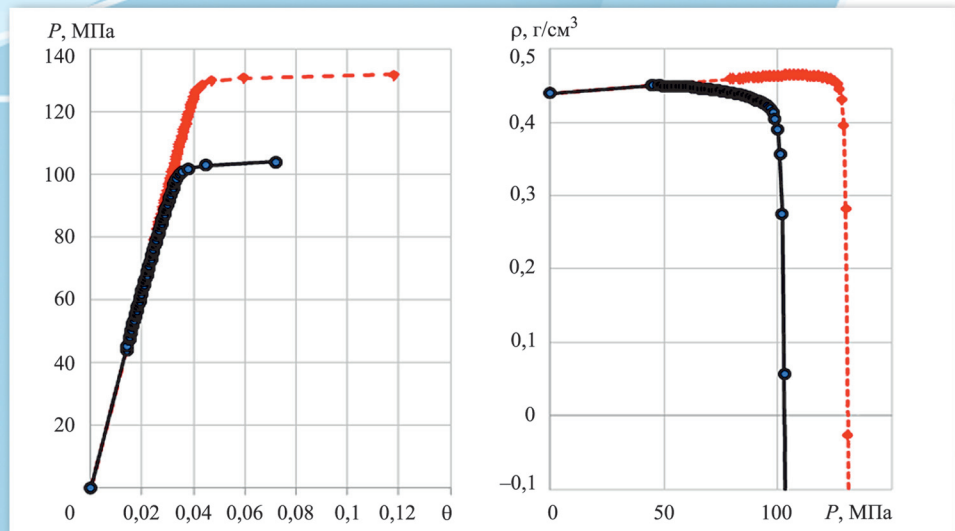


Рис. 7. Диаграммы нагружения сферопластика по рассмотренным выше моделям, показывающие изменение объемной деформации θ и плавучести q от величины давления P (обозначения соответствуют рис. 6)

Fig. 7. Diagrams of syntactic loading according to the above models showing variations of volume deformation θ and buoyancy q versus pressure P (symbols according to Fig. 6)



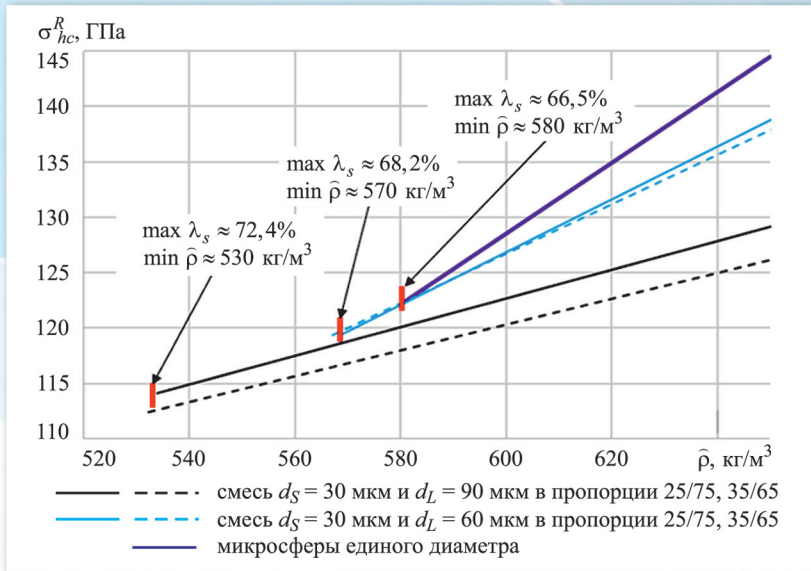


Рис. 10. Графики зависимости гидростатической прочности сферопластика от его плотности на основе монодисперсного распределения и двух бидисперсных распределений микросфер – 30–90 мкм и 30–60 мкм – с разными пропорциональными отношениями между ними

Fig. 10. Graphs of syntactic hydrostatic strength versus density based on a mono-dispersed distribution and two bi-dispersed distributions of micro spheres (30–90 μm and 30–60 μm) with different proportions between them

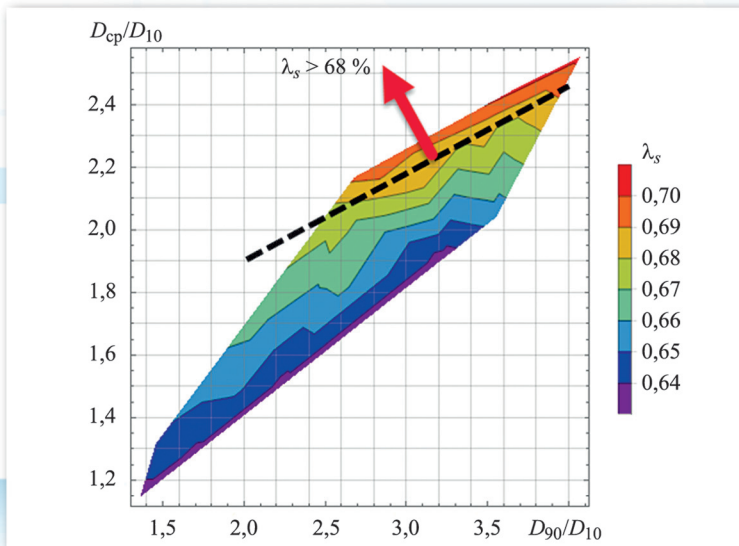


Рис. 11. Диаграмма, показывающая изменение величины КЗО в зависимости от отношения характерных диаметров D_{cp}/D_{10} и D_{90}/D_{10}

Fig. 11. Diagram showing variation of volumetric efficiency versus ratio of characteristic diameters D_{cp}/D_{10} and D_{90}/D_{10}

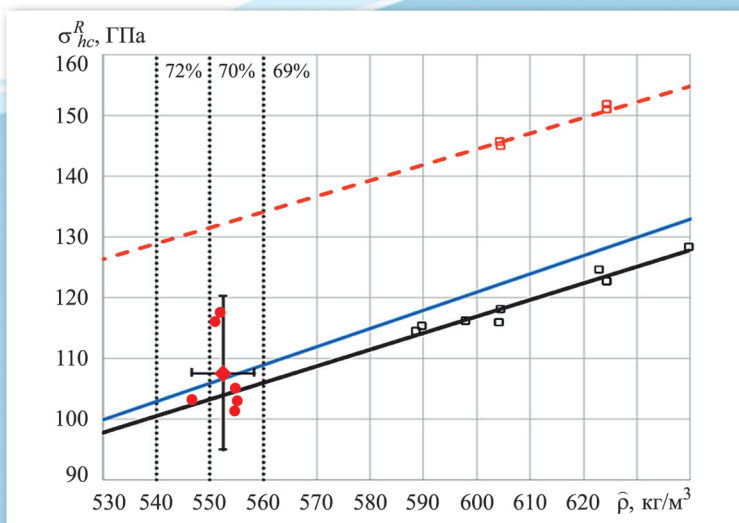


Рис. 14. Графики зависимости гидростатической прочности сферопластика от его плотности на основе исходного распределения микросфер, модели единой плотности и модели бидисперсной смеси микросфер

Fig. 14. Graphs of syntactic hydrostatic strength versus its density based on the initial micro sphere distribution, integrated density model and model of bi-dispersed micro sphere mixture

— исходное распределение микросфер по фракциям
 - - - модель единой плотности микросфер
 — модель на основе бидисперсной смеси
 ● результаты испытаний образцов СФП марки С-6Г
 ◆ среднее экспериментальное значение прочности с доверительными интервалами 95 %