

рументу надають відносний рух подачі і коливання у напрямку подачі. [3]

Оброблювану деталь 1 (рис. 10) закріплюють у патроні 2 і їй надають обертання з частотою $n=340$ об/с. Різець 3 закріплюють у вібруючому пристрої 4, встановленому на супорті 5. Супорт 5 за допомогою гвинта з'єднаний з приводом подачі 6. Вібруючий пристрій 4 налагоджують на амплітуду коливань $A_k=0,35$ мм і частоту $f=5,5$ Гц.

Під час обробки дискретні переміщення супорта 5 суміщають у часі з відведенням різця 3 від деталі за допомогою вібруючого пристрою.

Крок дискретних переміщень і параметри коливань вібруючого пристрою 4 приймають із співвідношення $S_{ш} < A_k$, де $S_{ш}$ – крок дискретних переміщень, мм; A_k – амплітуда коливань інструмента, або заготовки у напрямку руху подачі, мм.

При таких умовах забезпечуються дискретні переміщення супорта 5 по напрямних в період циклу, коли процес різання переривається. Напрявні 7 привода подачі розвантажуються від технологічного навантаження, що сприяє зниженню зношування, підвищенню довговічності і технологічну надійність привода подачі верстата.

Приведені приклади механізмів і передач показують, як можна нетрадиційними методами знижувати шкідливий вплив тертя на їх роботу. Особливо ефективно працюють механізми із зміною напрямків потоку потужності і навантаження або введення додаткових сил, які притискують робочі органи до напрямних усуваючи люфти, зазори і забезпечуючи високу точність їх роботи.

Список літератури

1. Пестунов В.М., Стеценко А.С., Коврышкин Н.А. Механические усилители мощности в приводе робототехнических комплексов// Вісник НТУУ „КПІ” Серія машинобудування.–К.:НТУУ „КПІ”–2009, с. 79-88
2. Пестунов В.М., Стеценко О.С. Підвищення ефективності механізмів подачі верстатних систем// Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету/ Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація/ -вип. 21-Кіровоград: КНТУ, 2008, с. 197-206
3. А.с. №10888887, Пестунов В.М, Каринов Е.А. Способ обработки материалов резанием. Оpubл. 30.04.1984, бюл. №16
4. Декл. патент №66677 Крыжановский В.А., Пестунов В.М., Гречка А.И. Силовая головка. Оpubл. 17.05.2004, бюл. №5
5. Декл. патент №17470 Пестунов В.М., Павленко І.І., Кабулов К.Б. Спосіб обробки отворів. Оpubл. 15.09.2006, бюл. №9

УДК 532.53:629.784

В.А. Ковалев, канд.техн.наук, Н.Г. Кришук, д-р техн.наук, А.С. Конюхов, канд.техн.наук
НТУ України “Киевский политехнический институт” г.Киев, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ЕМКОСТЯХ С ПЕРЕГОРОДКАМИ

Описано методику проведення чисельного експерименту з моделювання течій в'язкої нестисливої рідини у модельних ємкостях з перегородками на основі рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою методу скінчених елементів. Проводиться аналіз профілів компонент вектора швидкості та структури циркуляційних течій у меридіональних площинах, робиться висновок про коректність і вірогідність математичної моделі досліджених процесів.

The procedure of numerical calculations by finite-element methods of viscous incompressible flows in moving containers with baffles is described. The analysis of velocity profiles, circulation structures and effects on free space flows are made. There are conclusions of imitation models accuracy.

Введение

При полете космического аппарата (КА), начиная со старта до выхода на орбиту Земли, на него действуют разного рода внешние силы, например, от работающей двигательной установки, штатных маневров и т.д. Содержащиеся в его топливных баках жидкие горючее и окислитель, масса которых может составлять до 80 % массы всего объекта, могут двигаться в пространстве баков под действием сил инерции по неопределенному закону и оказывать заметное влияние на стенки баков и конструкции внутри-баковых демпфирующих устройств, выполненных в виде радиальных и кольцевых перегородок.

Исследование характера обтекания перегородок и распределения скоростей жидкости в их окрестности позволяет установить структуру течения, определить градиенты скоростей, конструктивные параметры перегородок и оптимизировать их влияние на инерционные течения жидкости не только в пристеночной области емкости, но и в пространстве, не охваченном перегородками. Это, в свою очередь, обеспечит оптимальное проектирование таких конструкций перегородок, которые будут достаточно эффективно влиять на течения в емкостях при меньшей массе

и габаритах, что позволит в конечном итоге увеличить полезную нагрузку КА, надежность его управления и продолжительность полета.

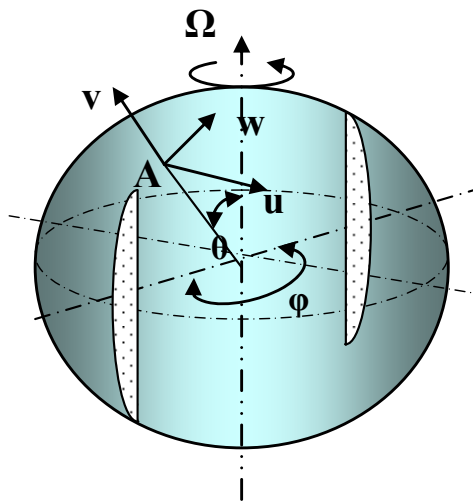


Рис.1. Схема расположения ортогональных перегородок в модельном сферическом сосуде при исследовании осесимметричных инерционных течений жидкости (u, v, w -компоненты вектора скорости жидкости, Ω -угловая скорость сферической оболочки, ϕ и θ – азимутальный и меридиональный координатные углы)

Экспериментальные исследования указанных внутри-баковых процессов в течениях с перегородками позволяют получить достаточно обширный материал по распределению скоростей жидкости в баках, коэффициентам гидродинамического сопротивления и т.д. [1, 2] и создать базу эмпирических результатов для создания математической модели исследуемых процессов.

Постановка задачи, уравнения движения жидкости и граничные условия

В механико-машиностроительном институте НТУУ «КПИ» проводились исследования структуры осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости в модельных емкостях цилиндрической и сферической конфигурации, имитирующих основные геометрические пропорции натуральных топливных баков КА [1]. Для верификации экспериментальных данных результаты исследований дополнялись данными математической модели внутри-баковых течений жидкого топлива.

Рассмотрение задач об осесимметричных течениях несжимаемой жидкости в ограниченных объемах основывается на анализе уравнений Навье-Стокса, введении граничных и начальных условий, соответствующих геометрии емкости и начальному распределению скоростей частиц жидкости в инерционном потоке, а также особенностям постановки задачи.

Уравнения Навье-Стокса для вращающейся жидкости можно представить в векторной форме

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \Omega \times (\Omega \times r) - 2\Omega \times u_r + \nu \nabla^2 V \quad (1)$$

где локальные и конвективные ускорения в левой части уравнения уравновешиваются слагаемыми в правой части - $\Omega \times (\Omega \times r)$ - центробежными силами инерции, $2\Omega \times u_r$ - силами Кориолиса, как правило, присутствующими во вращающихся течениях, $\frac{1}{\rho} \nabla p$ - градиентом давления, $\nu \nabla^2 V$ - силами вязкого трения.

Выражая уравнение (1) относительно окружной u , радиальной v и меридиональной w компонент вектора скорости, а также давления получим развернутую систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \vartheta} + \frac{uv}{r} + \frac{uw \operatorname{ctg} \vartheta}{r} &= v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2 \sin^2 \vartheta} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial \vartheta} + \frac{vw}{r} - \frac{u^2 \operatorname{ctg} \vartheta}{r} &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r^2 \sin^2 \vartheta} \right) \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} &= \frac{w^2 + u^2}{r} \end{aligned} \quad (2)$$

а также уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \vartheta} + \frac{2v}{r} + \frac{w \operatorname{ctg} \vartheta}{r} = 0.$$

Результаты экспериментальных исследований позволяют провести анализ весового вклада каждого слагаемого системы уравнений (2). Например, из результатов экспериментов по измерению поля скоростей течения известно, что градиенты радиальной v и меридиональной w составляющих вектора скорости составляют достаточно малые величины (до 12 % значения окружной скорости u), поэтому квадратами и произведениями этих величин мы пренебрегаем. Тогда система уравнений примет следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \vartheta} + \frac{uv}{r} + \frac{uw \operatorname{ctg} \vartheta}{r} &= v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2 \sin^2 \vartheta} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{u^2 \operatorname{ctg} \vartheta}{r} &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r^2 \sin^2 \vartheta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{u^2}{r}$$

Введем граничные условия для осесимметричной относительно вертикальной оси вращения жидкости

$$v = 0, \quad w = 0, \quad u = \Omega_0 R_0 \quad \text{при} \quad r = R_0,$$

$$v = 0, \quad w = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = 0 \quad (4)$$

$$w = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial \vartheta} = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad \vartheta = 0 \quad \text{и} \quad \vartheta = \pi (R < R_0).$$

Для оптимизации вычислительного процесса при решении указанных уравнений в предыдущих исследованиях, как правило, делались преобразования путем введения переменных функции тока и завихренности, однако, в настоящее время при значительно возросших вычислительных возможностях современных ЭВМ указанные уравнения можно решать относительно компонент скорости и давления. Применение программных комплексов MathLab, ANSYS 5.6, Fluent 2.4 [3, 4] позволяет визуализировать течения жидкости и оценить основные параметры течения не только качественно, но и количественно.

Одним из распространенных методов решения уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости являются методы конечных разностей и конечных элементов, которые позволяют заменить выражения в частных производных их разностными аналогами. Расчетная область, как правило, разбивается на 4 – 7 тысяч треугольных и прямоугольных элементов, что обеспечивает устойчивость конечно-элементной схемы и позволяет достаточно корректно провести дискретизацию уравнений, разработку алгоритма и проведение расчетов течений в емкостях с перегородками.

Более подробное описание методов дискретизации уравнений, построения расчетных сеток, учета геометрических особенностей пространства вычислений и процедуры численного эксперимента можно найти в работах [4, 5].

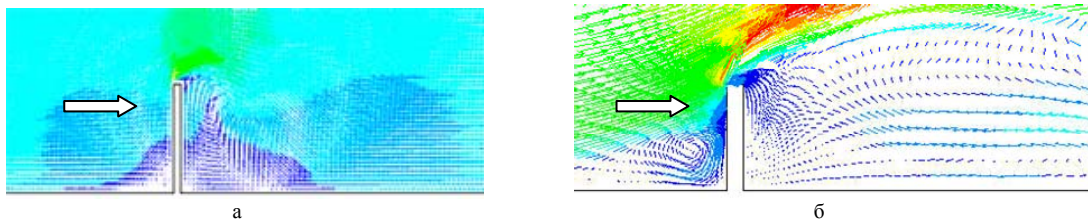


Рис. 2. Картина обтекания сплошной примыкающей к стенке перегородки при различных начальных скоростях жидкости: а – 12 мм/с; б – 19,5 мм/с

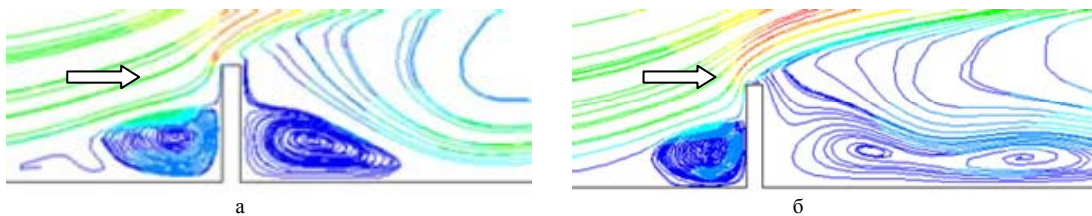


Рис.3. Траектории жидких частиц при обтекания сплошной примыкающей к стенке перегородку при различных скоростях жидкости: а – 19,5 мм/с; б – 31,2 мм/с

Анализ результатов численного моделирования течений

В настоящем исследовании приводятся результаты численного решения двумерных задач обтекания ортогональных перегородок, установленных перпендикулярно вектору скорости течения непосредственно у стенки и на заданном расстоянии от стенки. При этом оценивались не только характер распределения скоростей и траекторий частиц жидкости в окрестности перегородки, но и особенности влияния перегородки на пространство, не охваченное ими.

На рис. 2 и 3 приведены результаты численного решения задачи об обтекании сплошной перегородки, расположенной перпендикулярно вектору скорости потока и примыкающей к стенке. Для упрощения граничных условий радиус кривизны стенки сосуда принят равным бесконечности, то есть, стенка представляется плоской. Из результатов расчета можно видеть возникновение застойной области перед перегородкой и спутного циркуляционного следа за ней.

При этом у внутренней кромки перегородки, благодаря сужению общего сечения потока, образуется область ускорения частиц жидкости и формирования переходного слоя, толщина которого может достигать 63 % ширины перегородки и составлять до 19 мм (ширина перегородки равна 30 мм). Таким образом, циркуляционные течения за перегородкой могут распространяться на большее расстояние внутрь модельного сосуда и оказывать влияние на квазитвердую область инерционного течения.

Для изучения влияния на течение серии последовательно расположенных перегородок, на рис. 4 представлены соответствующие результаты расчета для двух примыкающих сплошных перегородок. Из результатов расчета очевидны следующие параметры циркуляционных структур:

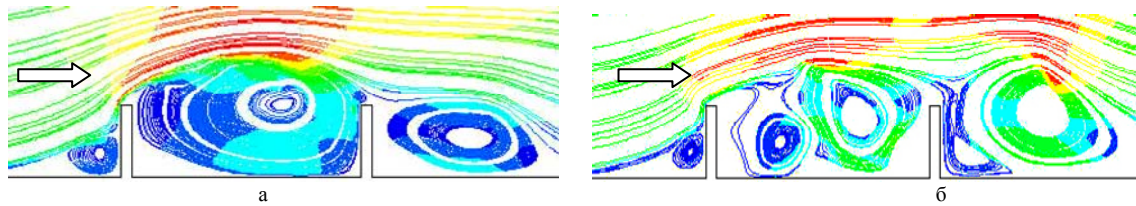


Рис.4. Траектории жидких частиц при обтекании двух сплошных перегородок при различных скоростях жидкости:
а – 19,5 мм/с; б – 31,2 мм/с

1 – за каждой из перегородок возникает спутный след, диаметр которого на 30 – 55 % превышает ширину перегородки;

2 – в циркуляционное течение за перегородкой вовлекаются слои жидкости, расположенные между кромкой перегородки и квазитвердым ядром течения;

3 – несмотря на дробление циркуляций при возрастании начальной скорости течения, их размеры не превышают первоначально установленные при меньших числах Рейнольдса.

Как отмечалось в предыдущих работах [1, 2], важным аспектом влияния перегородок на инерционные течения жидкого топлива является использование особенностей формирования пристеночного заторможенного течения, в пределах которого достаточно сильно влияние вязкой диффузии. В пределах короткого времени (до $T = \Omega_0 t = 3,5$) пристеночное течение занимает до $0,15 \cdot R$ поэтому более целесообразно применение перегородок, отстоящих от стенки, например, на расстояние, равное 20 мм.

В тестовой задаче с использованием отстоящих сплошных перегородок, результаты визуализации которой приведены на рис. 5 и 6, структура спутного следа за перегородкой напоминает классическое распределение вихревых течений типа дорожки Кармана. Кроме того, длина следа значительно превышает расстояние между последовательно расположенными перегородками, что свидетельствует о нецелесообразности применения в модельных баках 6- и 8-элементной конструкции внутри-бакового устройства, а использование 2- и 4-элементных стабилизаторов. Тогда габариты спутного следа за перегородкой будут соразмерны расстоянию между перегородками, что позволяет оптимизировать структуру пристеночного низкоскоростного течения и минимизировать вес перегородок.

При оценке качественной картины обтекания перегородки следует заметить, что несмотря на более высокие градиенты продольной составляющей скорости в зазоре между стенкой и внешней кромкой перегородки, пристеночное течение очень быстро затухает и не участвует в распределении скорости. Симметричное распределение линий тока за перегородкой демонстрирует формирование двух циркуляций, распространяющихся на расстояние порядка $(4 - 4,5) \cdot b$, где b – ширина перегородки.

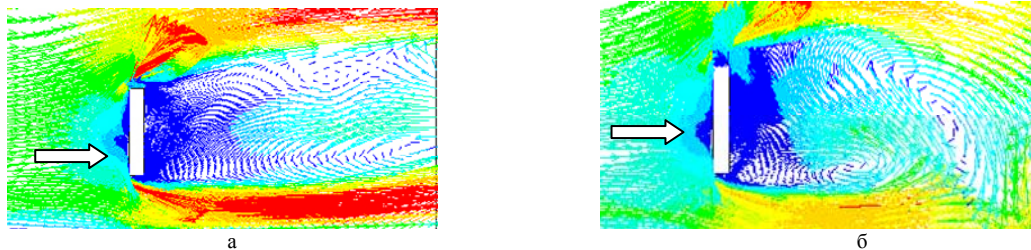


Рис. 5. Структура циркуляционного следа за сплошной отстоящей перегородкой при различных скоростях жидкости:
а – 25,3 мм/с; б – 37,8 мм/с

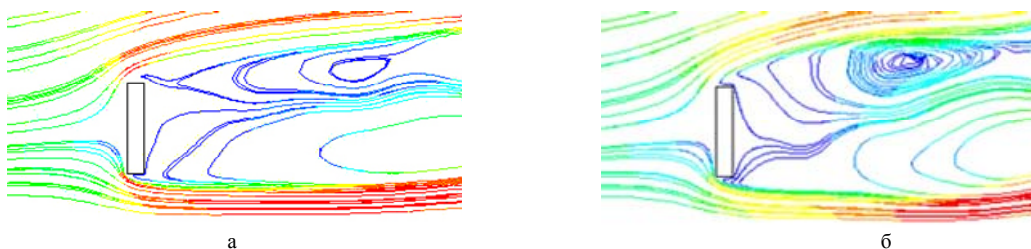


Рис. 6. Траектории жидких частиц при обтекании сплошной отстоящей от стенки перегородки при различных скоростях жидкости: а – 23,7 мм/с; б – 37,4 мм/с

Дальнейшее увеличение зазора не приводит к качественным изменениям структуры инерционного течения в пристеночном слое, поэтому основными направлениями совершенствования влияния перегородок на течения следует искать в перфорированных конструкциях перегородок с переменным коэффициентом проницаемости. Кроме того, круговые моменты динамического воздействия инерционного течения пропорциональны эффективной площади перегородки и характеру ее расположения в потоке, а по структуре и размерам спутного следа за перегородками можно судить о величине суммарного кругового возмущающего момента со стороны жидкости, действующего на конструкцию топливного бака и космического аппарата в целом.

Эти факторы являются определяющими при проектировании оптимальных с точки зрения гидродинамики конструкций перегородок в модельных баках космического аппарата.

Выводы

Численное исследование гидродинамических особенностей обтекания внутри-баковых демпфирующих перегородок в топливных баках позволяет установить не только качественную картину распределения скоростей, но и количественно оценить характер развития этого влияния во времени во всем пространстве топливного бака. Верификация результатов измерений в рамках физического моделирования процессов подтвердила достаточно высокую достоверность полученных данных относительно скоростей основного потока и вторичных циркуляционных течений в областях спутного следа за перегородками.

Характер распределения скоростей циркуляционных течений в областях за перегородками могут с достаточно высокой достоверностью прогнозировать характер развития пристеночных течений и их влияние на распределение скорости основного потока в пространстве, не охваченном перегородками. Таким образом, подтверждается гипотеза о влиянии перегородки на внутреннее свободное пространство бака, и возможное перераспределение силовых воздействий на жидкость.

Это, в свою очередь, позволяет организовать систему компенсационных мероприятий системы ориентации и стабилизации КА для демпфирования нежелательных влияний жидкого топлива на конструкцию и характер полета объекта.

Список литературы

1. Ковалев В.А. Влияние внутри-баковых перегородок на течение жидкого топлива в баках космического аппарата // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение, 2006, № 48, с.73-79.
2. Ковальов В.А. Гідродинамічний опір внутрішньо-бакових пристроїв інерційному потокові рідини у торовому резервуарі // Вісник Черкас. держ. технол. ун-ту, 2004, вип.4, с. 167-171.
3. Belytschko T., Krongauz Y., Organ D. Meshless methods: an overview and recent developments // Comput. Methods Appl. Meth. Eng., 1996, v.139, № 1 – 4, p. 3 – 48.
4. Donea J., Roig B., Huerta A. High order accurate time-stepping schemes for convection-diffusion problems // Tech. Report 42, Int. Center for Numer. Meth. Eng., 1998, Barcelona, p.25 – 39.
5. Zienkiewicz O., Codina R. A general algorithm for compressible and incompressible flow. 1. The split, characteristic-based scheme // Int. J. Numer. Methods Fluids, 1995, vol. 20, p. 869 – 885.

УДК 539.3

Н.Г. Кришук¹, д-р техн.наук, с.н.с., В.А. Маланчук², д-р техн.наук, член-корр., А.В. Копчак², В.А. Ещенко¹
 1-НТУ України «Київський політехнічний інститут», г.Київ, Україна
 2-Національний медичний університет імені А.А.Богомольця, г.Київ, Україна

ИМИТАЦИОННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛЮСТИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

На основі методу скінченних елементів розроблено алгоритм автоматизованого створення індивідуальних комп'ютерних моделей пружно-деформованого стану щелеп людини. Алгоритм враховує індивідуальні характеристики їх геометрії, механічні анізотропні властивості кісткової тканини і активність жувальних м'язів пацієнта. Приведені результати дослідження напружень і деформацій в моделях біомеханічних систем, встановлені їх закономірності для щелепи людини при функціональному навантаженні.

On the finite elements method basis the automated creation algorithm of individual computer models of the man's jaws tensely-deformed state is developed. The algorithm takes into account the individual descriptions of their geometry, mechanical anisotropic properties of bone fabric and activity of patient's masticator muscles. The tensions research and deformations are resulted in the models of the biomechanical systems and conformities to the law of man's jaws functional loading.

Современная медицина широко использует имплантацию искусственных устройств и материалов для лечения заболеваний, устранения различных дефектов и деформаций. Так, в челюстно-лицевой хирургии широко используют имплантаты зубов, эндопротезы височно-нижнечелюстных суставов и костей лица, разнообразные аппараты и фиксаторы для лечения переломов челюстей, синтетические костно-замещающие материалы. При этом проведение