

# ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. Е. Буров

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск

Моделирование возможных предельных состояний и прогнозирование несущей способности являются неотъемлемой частью обеспечения требований прочности и надежности конструкции металлокомпозитных сосудов высокого давления (МКБВД). Эта задача осложняется необходимостью учета рассеяния механических характеристик материала силовой оболочки как следствие статистического разброса прочности армирующего волокна и несовершенств технологии изготовления. В настоящей работе на основе вероятностного подхода и модели прогрессирующего разрушения выполнен анализ влияния вариаций параметров силовой оболочки и механических свойств материала на несущую способность МКБВД объемом 200 литров, изготовленного путем непрерывной намотки углеродного волокна, пропитанного эпоксидным связующим, на тонкий титановый лейнер.

## ВВЕДЕНИЕ

Технология непрерывной намотки широко применяется при изготовлении армированных оболочек, используемых в качестве основных несущих элементов композитных сосудов высокого давления с металлическим лейнером. Совокупность уникальных свойств, включающих высокие показатели массовой эффективности, усталостной долговечности и коррозионной стойкости, расширила в последнее время область современного применения МКБВД от аэрокосмической и авиационной техники до химического, автомобильного и медицинского и спортивного сегментов промышленности.

Вес, как один из наиболее важных параметров проектирования МКБВД, в основном определяется предельным давлением, при котором происходит разрушение силовой композитной оболочки и по величине которого с учетом схемы армирования рассчитывается ее толщина. Моделирование реализуемых типов предельных состояний и прогнозирование несущей способности являются фундаментальными задачами, решение которых необходимо для получения безопасной и экономически эффективной конструкции МКБВД.

Как правило, критические нагрузки для конструкций из слоистых композитов определяются в предположении, что материал утрачивает несущую способность при разрушении хотя бы одного из его слоев. Учитывая, что окончательное разрушение слоистых материалов происходит в результате процесса накопления повреждений, охватывающего различные масштабные уровни, применение критерия «разрушения первого слоя» обычно приводит к консервативной оценке прочности. Поэтому прогнозирование несущей способности МКБВД требует учета прогрессирующего разрушения, связывающего эволюцию повреждений в структуре композитов с деградацией их механических свойств в условиях постепенного роста внешней нагрузки.

Другим аспектом проблемы достоверной оценки давления разрушения МКБВД является необходимость учета возможного рассеяния механических свойств, определяющих жесткостные и прочностные характеристики материала силовой оболочки. В первую очередь это относится к армирующим волокнам, стохастическая природа прочности которых хорошо известна, и отклонениям конструкции от проектных параметров в результате несовершенств технологии изготовления.

## МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

В настоящей работе на основе вероятностного подхода и модели прогрессирующего разрушения выполнен анализ влияния вариации параметров силовой оболочки на несущую способность МКБВД объемом 200 литров, изготовленного путем непрерывной намотки четырех слоев ленты углеродного волокна, пропитанного эпоксидным связующим, на тонкий титановый лейнер (рис. 1). Рассмотренный МКБВД предназначен для хранения топлива электрореактивной двигательной установки космического аппарата. Следующие параметры конструкции бака и механические свойства материалов использовались в расчетах: радиус  $R$ , угол намотки  $\varphi_R$  и толщина слоя композита  $t_R$  на экваторе, соответственно, 416 мм, 4.8 и 2 мм; толщина лейнера  $t_l = 1,0$  мм; монослой композита (индекс 1 - направление армирования) –  $E_1 = 165$  ГПа,  $E_2 = E_3 = 7,7$  ГПа,  $G_{12} = G_{13} = 3,8$  ГПа,  $G_{13} = 3,4$  ГПа,  $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,26$ ,  $\nu_{23} = 0,49$ , пределы прочности при растяжении  $X_1 = 1850$  МПа,  $X_2 = 80$  МПа, при сжатии  $Y_1 = -1500$  МПа,  $Y_2 = -180$  МПа, при сдвиге  $S_{12} = 85$  МПа, энергия разрушения  $G_{c1} = 106,3$  Н/мм,  $G_{c2} = 0,28$  Н/мм; материал лейнера –  $\sigma_{0.2} = 340$  МПа,  $\sigma_v = 430$  МПа,  $E = 110$  ГПа,  $\nu = 0,32$ .

Моделирование несущей способности в вероятностной постановке выполнено методом статистических испытаний (метод Монте-Карло), который заключается в многократном решении детерминированной задачи определения НДС и предельного давления с использованием в каждом случае различного набора значений случайных переменных (рис. 2). Как показывают экспериментальные исследования, для типичного МКБВД объемное содержание волокон  $V_f$  изменяются в пределах от 0,45 до 0,6, а отклонение угла армирования  $\varphi$  при геодезической намотке составляет  $\pm 2^\circ$  по отношению к теоретическому значению. Вариация характеристик прочности слоя композита определялась в зависимости от  $V_f$ . Предполагается, что переменные подчиняются равномерному закону распределения вероятностей. Искомыми параметрами анализа являются функции распределения значений давления разрушения МКБВД и максимальных эквивалентных напряжений в лейнере.

Моделирование прогрессирующего разрушения композитной оболочки МКБВД состоит в реализации следующих шагов: 1) решение задачи МКЭ, определение параметров НДС для слоев пакета каждого элемента композитной оболочки; 2) проверка инициации разрушения и идентификация его типа по критериям Хашина; 3) при выполнении критерия разрушения расчет параметров поврежденности и соответствующих им значений упругих свойств материала, переход на шаг 1, вычисления повторяются до отсутствия поврежденных слоев; 4) приращение давления и повторение цикла шагов 1-3. Потеря несущей способности конструкции определяется как спонтанное увеличение числа поврежденных элементов при неизменной нагрузке (давлении разрушения). Основные соотношения для поврежденного ортопронного материала и закон накопления повреждений представлены на рис. 3.

Геометрия образующей МКБВД вычислена на основе моноотропной модели композита, согласно которой его жесткость и прочность обеспечивается только за счет армирующих волокон. Вычислительная конечно-элементная модель (рис. 4), реализованная в среде пакета инженерного анализа ANSYS, представляет собой  $45^\circ$  сегмент оболочки вращения, состоящей из лейнера и композитного слоя, которые контактируют между собой с учетом сил трения. Модель построена на базе 8-узлового конечного элемента оболочки с опцией слоистого и однородного тела для композитной оболочки и лейнера, соответственно.

Для построения варианта модели МКБВД значения объемного содержания волокон  $V_f$  и угол армирования  $\pm\varphi$  каждого слоя выбирались случайным образом. Учитывался процесс намотки, при котором связующее выдавливается из внутренних слоев в направлении внешней поверхности бака, что приводит к градиенту  $V_f$  по толщине. Характеристики упругих и прочностных свойств монослоя композита определялись с использованием микромеханической модели Халпина-Цая. Поведение лейнера описывается моделью упругопластичного материала с изотропным упрочнением, соответствующего уравнению Прандтля-Рейсса и условию пластичности Мизеса в детерминированной постановке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эволюция поврежденности в композитной оболочке при возрастании нагрузки в детерминированной постановке представлено на рис. 5 для МКБВД, значения параметров которого приведены выше. На шкале изолиний уровня поврежденности значение 1 соответствует полному разрушению элемента, 0 – неповрежденный элемент. Инициация и накопление поврежденности силовой оболочки определяется, прежде всего, анизотропией прочностных свойств однонаправленной ленты композита. Первоначально, низкая прочность в направлении перпендикулярном армированию обуславливает возникновение повреждений в области полюсного отверстия по механизму разрушения матрицы от действия растягивающих напряжений (рис. 5а). По мере увеличения нагрузки такие повреждения развиваются в направлении экватора. Дальнейшее увеличение нагрузки и концентрация напряжений, возникающая в соседних к разрушенным элементам, приводит к повреждениям слоев композита по механизму обрывов волокон в результате превышения уровня напряжений прочности в направлении армирования (рис. 5б). Их накопление определяет резкое снижение жесткости силового слоя, спонтанному росту поврежденности при неизменной нагрузке, что в конечном итоге ведет к полной потере несущей способности (рис. 5в). Окончательное разрушение конструкции МКБВД произошло при внутреннем давлении порядка 20,1 МПа и сопровождалось возникновением недопустимых деформаций в материале лейнера.

Использование значений объемного содержания волокон и угол армирования в качестве случайных переменных ведет к тому, что механические характеристики слоев индивидуальны для каждого из расчетных случаев. Это определяет вариативность параметров НДС силовой оболочки и, в свою очередь, разрушающего давления.

Выборка вариантов МКБВД составила 100 образцов. Полученные эмпирические частотные распределения значений давления разрушения аппроксимировали нормальным законом. На рис. 6 приведена плотность функции распределения давления разрушения МКБВД. Среднее значение и стандартное отклонение распределения составляют 19,9 МПа и 1,1 МПа, соответственно. Разница значения предельного давления, полученные с использованием двух различных подходов, составляет порядка 1%. Однако вероятностный анализ предоставляет гораздо больше информации для оценки близости состояния конструкции к предельному. Прежде всего это относится к возможности оценить влияния вариативности процесса изготовления на несущую способность МКБВД. Кроме того, вероятностный подход позволяет решать задачи прочностной надежности МКБВД и прогнозировать более рациональный конструктивный вариант, чем решение на основе традиционного метода, базирующегося на коэффициенте запаса.



Рис. 1 - Металлокомпозитный бак высокого давления

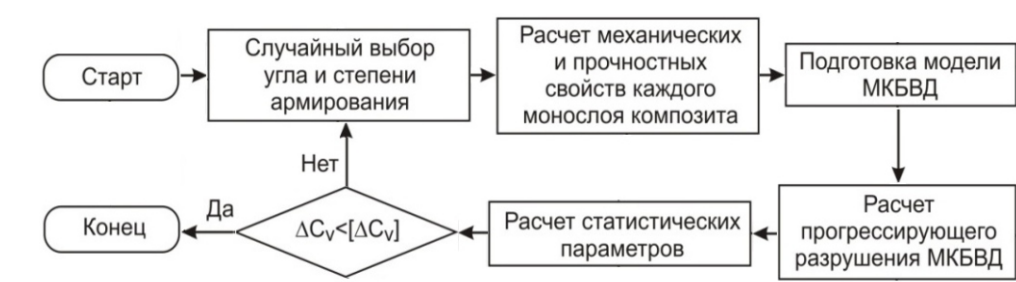


Рис. 2 - Алгоритм вероятностного моделирования несущей способности МКБВД

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta(1-d_s)G_{12} \end{bmatrix} \{\varepsilon\}$$

$$\Delta = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21},$$

Разрушение волокон при растяжении  $u_{eq} = L_e \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}$ ,  $\sigma_{eq} u_{eq} = L_e \langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \sigma_{12} \varepsilon_{12}$ .

Разрушение волокон при сжатии  $u_{eq} = L_e \langle -\varepsilon_{11} \rangle$ ,  $\sigma_{eq} = \langle -\sigma_{11} \rangle$ .

Разрушение матрицы при растяжении  $u_{eq} = L_e \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}$ ,  $\sigma_{eq} u_{eq} = L_e \langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \sigma_{12} \varepsilon_{12}$ .

Разрушение матрицы при сжатии  $u_{eq} = L_e \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}$ ,  $\sigma_{eq} u_{eq} = L_e \langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \sigma_{12} \varepsilon_{12}$ .

$\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций,

$\langle \alpha \rangle = (\alpha + |\alpha|)/2$ ,  $L_e$  – характерный размер элемента.

Параметр поврежденности  $d = 1 - \frac{u_{eq}^0 (u_{eq}^c - u_{eq})}{u_{eq} (u_{eq}^c - u_{eq}^0)}$ ;  $u_{eq}^0 \leq u_{eq} \leq u_{eq}^c$

$u_{eq}^0$  эквивалентные перемещения инициации разрушения.



$$G_c = \int_0^{u_{eq}^c} \sigma_{eq} du_{eq} = \frac{1}{2} \sigma_{eq}^c u_{eq}^c$$

$\sigma_{eq}$ ,  $u_{eq}$  – эквивалентные напряжения и перемещения,  $\sigma_{eq}^c$ ,  $u_{eq}^c$  – их предельные значения

Рис. 3 - Определяющие соотношения для трансверсально-изотропного поврежденного материала и закон развития повреждений

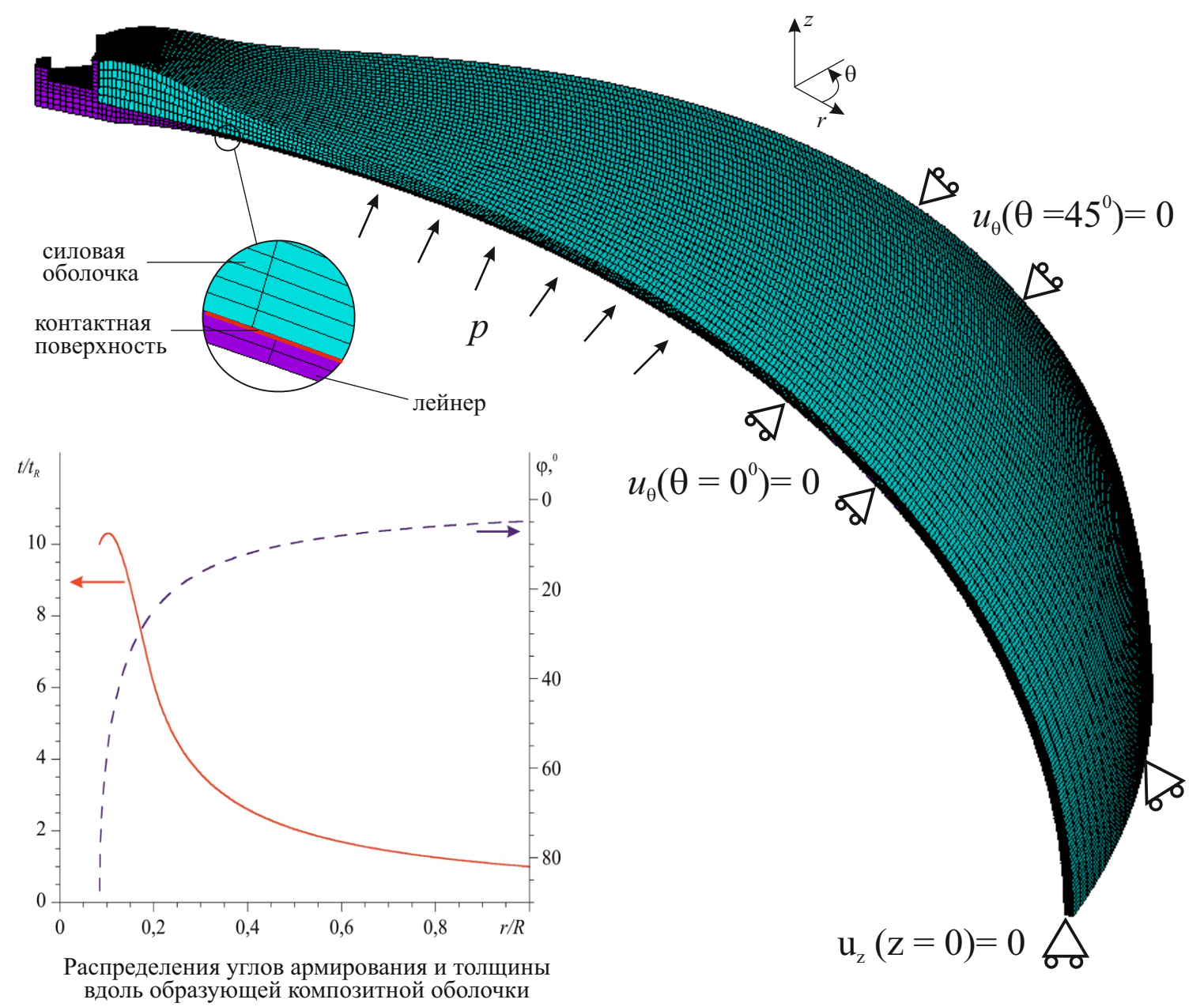


Рис. 4 - Конечно-элементная модель МКБВД

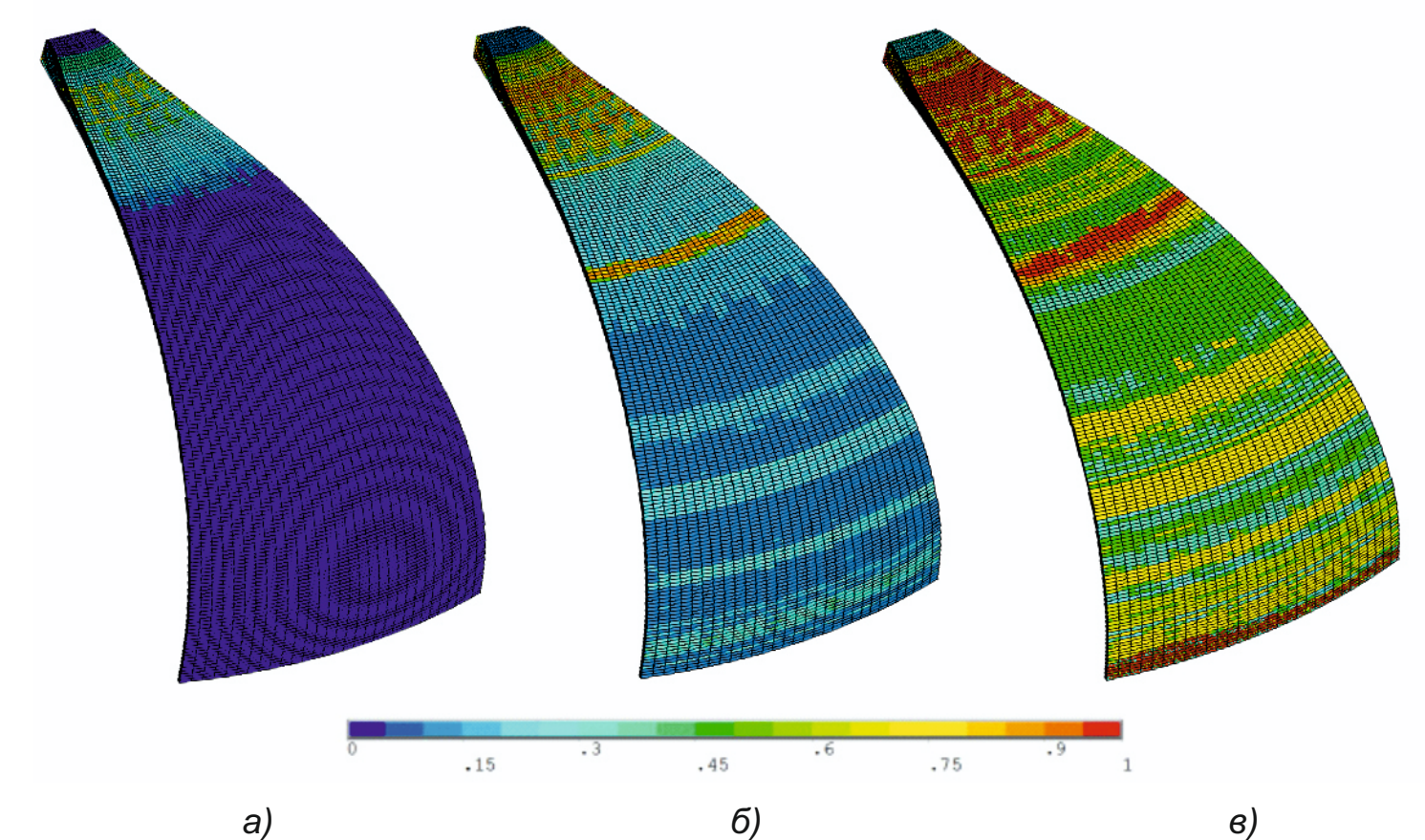


Рис. 5 - Развитие повреждений в композитной оболочке при увеличении внутреннего давления. На шкале уровня поврежденности: 0 - отсутствие повреждения, 1 - полное разрушение

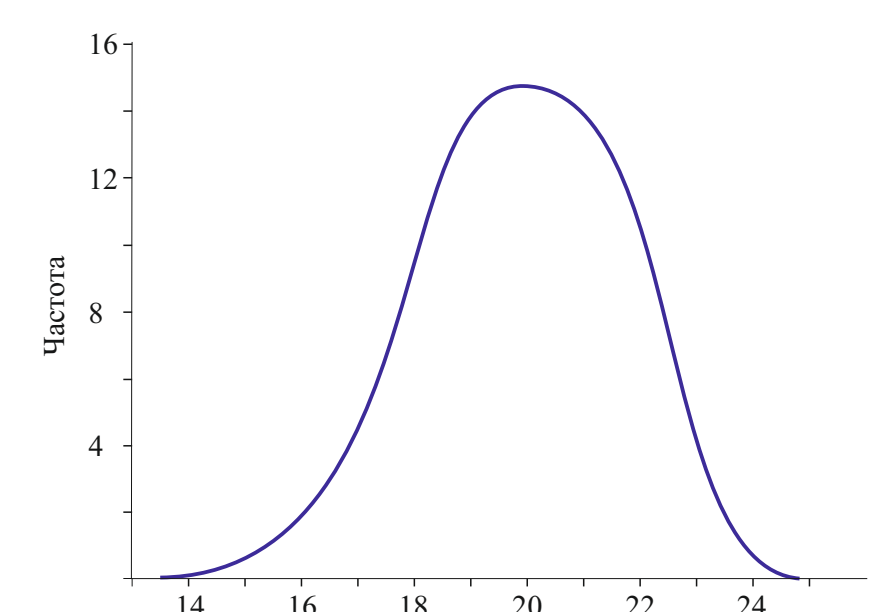


Рис. 6 - Разрушающее давление  $P_f$ , МПа