

## ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАПЕРЕД ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ СПОСОБОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ПРОПИТКИ С НАГРЕВОМ

*Проведен анализ пропитки пористых тел вязкими ( $\mu \sim 100$  Па·с) сжимаемыми средами под высоким давлением с учетом температурного фактора. Предложены математические модели, пропитки пористых тел под высоким давлением с нагревом как для легкоплавких металлов, так и для вязких органических сред. Даны обоснования применения каждой из них. Обоснована роль выдержки под давлением и дана количественная ее оценка. На основе рассмотренных математических моделей даны рекомендации по определению оптимальных параметров процесса пропитки и выбору соответствующих установок.*

**Ключевые слова:** гидростатическая обработка, математическая модель, камера высокого давления, вязкая среда, пропитка, пористые тела.

### Введение

В настоящее время с развитием и появлением новых технологий и техники в различных областях промышленности (авиация, машиностроение, атомная энергетика) возникает все большая потребность в новых видах материалов со специальными свойствами.

В основном это специальные сплавы и композиционные соединения (композиты). Характерная особенность композитов заключается в том, что эти материалы включают в себя совокупность свойств: жесткой основы (керамика, металлокерамика, металл, любые сплавы) и более пластичного наполнителя. Наполнитель (инфильтрат) используется и как связующее, и как материал, который придает изделию специальные дополнительные свойства: физические, прочностные, химические, которые необходимы для решения поставленной технической задачи.

Одним из направлений в получении такого рода материалов являются процессы гидростатики, т.е., получение всего изделия целиком или доработки заготовки этим методом, для придания ему требуемых свойств. Пропитывать пористое изделие могут полностью (по всей глубине), либо частично (на определенную глубину). Особые сложности при пропитке пористых основ доставляют «жидкости» с начальной (при  $T = 20$  °С) вязкостью  $\mu_0 \geq 10$  Па·с. К ним можно отнести: этиленоксиды, полиформальдегиды, полипропилен, полистирол, полиамиды, полиуретаны, различные смолы и т.д. Для качественной пропитки этими «жидкостями» необходимые технологические давления могут выражаться в сотнях МПа. Особенно если учесть, что размер пор пропитываемых структур может колебаться от долей миллиметра до долей микрона. Чем выше давление на границе инфильтрат-осно-

ва, тем более качественнее получается изделие (полное заполнение всех пор, выдавливание газовой фазы).

Как правило, пропитку пористых заготовок вязкими средами под давлением проводят в гидростатах. Технологическая обработка в них может осуществляться как при обычной (20 °С) температуре, так и с нагревом в зависимости от физических свойств инфильтратов (смолы, полимерные пластики, легкоплавкие сплавы и металлы). Пропитка пористых тел различными вязкими средами рассмотрена автором ранее в работах [1, 2]. В ряде случаев, когда начальная вязкость инфильтрата значительна ( $\mu_0 \geq 10$  Па·с), или при обычной ( $T = 20$  °С) температуре инфильтрат находится в твердом состоянии (смолы, сплавы), то для успешного процесса пропитки под давлением, необходимо применять нагрев.

### Анализ достижений

В восьмидесятые годы было проведено ряд работ по «залечиванию» внутренних микропор и дефектов на изделиях ответственного литья, а также заполнению «закрытию» микропор с использованием изостатики при температурах  $T \sim 400$  °С и 450 °С и давлении  $P \sim 200$  МПа стекловидной массой. В связи с этим можно отметить, что технически вполне возможно проводить работы по созданию композиционных материалов методом пропитки пористых оснований вязкими средами (находящимися в твердом состоянии при обычных условиях  $T = 20$  °С) под высоким давлением с использованием нагрева.

Поэтому работы в этом направлении считаются актуальными и перспективными.

Для создания новых видов композиционных материалов была разработана технология по пропитке по-

ристых заготовок вязкими средами под высоким (до 1000 МПа) давлением при различных граничных и начальных условиях. Для исследования этих процессов было выведено и решено уравнение фильтрации вязких сжимаемых жидкостей в пористые тела под высоким давлением [3].

Так как все без исключения жидкие среды с увеличением давления сжимаются, т.е. уменьшаются в объеме, увеличивая свою вязкость и плотность, то в предлагаемой математической модели все эти факторы учтены в дифференциальной форме в зависимости от величины давления ( $P$ ). В процессе пропитки, распределение давления любой жидкости по глубине пропитываемого пористого тела определяется из решения уравнения (1)

$$\left\{ \frac{\left( \frac{a}{b+P} \right)}{1-a \cdot \ln \left( \frac{b+P}{b} \right)} \cdot \left( 1+a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right) \right\} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu_0} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1+a \cdot \ln \frac{b+P}{b}}{e^{CP}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Пористые образцы, используемые для исследования течения различных жидкостей под давлением, представляли собой в сечении прямоугольник длиной  $L=150$  мм со свободными торцами и экранированной металлом боковой поверхностью. Вследствие этого жидкость могла проникать в тело только со стороны открытых торцов. Основные параметры: давление ( $P$ ) и перепад давления ( $\text{Grad } P$ ) определяются только по координате ( $x$ ), поэтому поставленная задача носит линейный характер.

**Граничные условия** для данного случая примут вид:

$$P(0, t) = v_y \cdot t + 0,1,$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \left( \frac{L}{2}, t \right) = 0.$$

Первое условие отражает закон изменения давления на границе входа жидкости в тело. Это изменение носит линейный характер и определяется произведением скорости увеличения давления  $v_y$  (МПа/с) на время  $t$  (с). Второе условие определяется симметрией, т.е. в среднем сечении образца поток отсутствует.

**Начальное условие** задается исходя из того, что в начальный момент времени давление жидкости равно атмосферному (0,1 МПа)

$$P(x, 0) = 0,1.$$

Математическая модель фильтрации различных сжимаемых жидкостей в пористые среды (1) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение

в частных производных второго порядка и точного аналитического решения не имеет. Решение задачи осуществлялось с использованием конечно-разностной аппроксимации по неявной схеме, не требующей проверки на устойчивость.

«Аналитические приближенные методы решения задач нестационарных движений вязко-пластических сред довольно громоздки, зачастую приводят к плохо обозримым результатам и оцениваются лишь на некоторых эталонных решениях» [4]. В предлагаемом уравнении (1) достоверность результатов любых решений можно проверить экспериментально – по глубине зоны разрушения при быстром ( $\sim 0,1$  с) сбросе давления в гидростате [5].

Численные решения этого уравнения дают возможность анализировать по глубине и по времени распределение давления просачивающегося в поры тела инфильтрата при различных задаваемых граничных и начальных условиях. Зная давление инфильтрата на любой глубине пропитываемого тела, можно определять напряженно-деформированное состояние пористой основы в этой зоне, которое дает возможность контролировать ее целостность.

В уравнениях 2, 3 и 4 показано, в какой математической форме учтены законы изменения **вязкости, плотности и сжимаемости** жидкостей от величины давления ( $P$ ):

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{CP}; \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right); \quad (3)$$

$$\chi = \frac{a}{1 - a \cdot \ln \frac{b+P}{b}}. \quad (4)$$

где  $P = P(x, t)$  давление, как функция координаты длины ( $x$ ) и времени ( $t$ );

$\mu_0$  – динамическая вязкость жидкости при  $T = 20$  °С (Па·с);

$\rho_0$  – плотность жидкости при  $T = 20$  °С (г/см<sup>3</sup>);

$k$  – коэффициент проницаемости (м<sup>2</sup>);

$\chi$  – сжимаемость (МПа<sup>-1</sup>);

$a$  и  $b$  – коэффициенты сжимаемости жидкости Тэйта;

$C$  – пьезокэффициент вязкости (Па<sup>-1</sup>).

При пропитке пористых основ средами, вязкость которых  $\mu_0 < 10$  Па·с, особых трудностей в определении технологических параметров процесса не возникает. Технологические трудности появляются и возрастают с увеличением начальной вязкости ( $\mu_0$ ) пропитываемой среды: 1 – определение скорости увеличения давления пропитываемой среды в гидростате; 2 – проблемы в сохранении целостности пропитываемого тела; 3 – определение максимального дав-

ления; 4 – определение скорости уменьшения давления в гидростате от максимального до атмосферного; 5 – суммирование затрат времени на весь технологический процесс.

### Постановка задачи

С увеличением температуры вязкость жидкостей уменьшается, поэтому, в данной работе будут рассматриваться вопросы пропитки пористых тел вязкими ( $\mu \geq 10$  Па·с) и твердыми при обычных условиях средами с учетом нагрева.

В работе [6] был проведен анализ изменения плотности ( $\rho$ ) и вязкости ( $\mu$ ) с ростом температуры  $T$  от 20 до 80 °С и давления ( $P$ ) от 0 до 1000 МПа ряда жидкостей, (глицерина, касторового и трансформаторного масел).

Классическая зависимость изменения вязкости жидкости ( $\mu$ ) от температуры имеет вид:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-\gamma T}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – температурный коэффициент вязкости ( $T^{-1}$ );

$T$  – температура нагрева (°С).

Исследования по изменению вязкости различных жидкостей от величины давления и температуры проводились во ВНИИФТРИ [7]. Жидкости исследовали по точкам (температура – давление), но процессы замеров носили изотермический характер, т.е., изменение вязкости жидкостей определяли:  $T = 20$  °С, давление ( $P$ ) от 0 до 1000 МПа;  $T = 40$  °С, давление ( $P$ ) от 0 до 1000 МПа, и т. д., до  $T = 100$  °С включительно. При анализе результатов было выявлено, что пьезокоэффициент вязкости ( $C$ ) незначительно ( $\pm 2,5$  %) зависит от давления и при  $T = \text{const}$  и изменение вязкости можно определять согласно выражению (2)  $\mu = \mu_0 \cdot e^{CP}$ . С совместным изменением в гидростате как давления, так и температуры – изменение вязкости должно определяться по совместным законам (2) и (5), но при этом отклонения от реальных результатов превышают 30 %.

В справочной литературе, как правило, задаются пьезокоэффициент вязкости ( $C$ ) при  $T = 20$  °С и температурный коэффициент ( $\gamma$ ), при  $T = 30$  ° или 40 °С. Поэтому автором были проведены теоретические исследования и даны рекомендации по использованию обобщенной зависимости (6) – изменения вязкости как от давления ( $P$ ), так и от температуры ( $T$ ) в общем уравнении пропитки (8). Рекомендации действительны при работе в интервале температур 20 °...100 °С. При более высоких температурах аналогичные исследования не проводились ввиду возможных молекулярных перестроек и химических распадов исследуемых жидкостей и их смесей.

Все исследования по изменению вязкости от совместного воздействия давление + температура носили изотермический характер. Основная причина таких

исследований – это сложность в определении скорости скатывания шарика в среде под высоким давлением с изменяющейся температурой (необходимо отметить, что на сегодняшний день изменение вязкости от давления с учетом температуры определяют по закону Стокса – скорости скатывания шарика). Анализ изменения вязкости жидкостей от давления с учетом температуры проводился по точкам, используя различные изотермические режимы.

С изменением давления и температуры пьезокоэффициент вязкости ( $C$ ) и температурный коэффициент ( $\gamma$ ) изменяются – уменьшаются. Их изменения можно аппроксимировать экспоненциальной функцией: пьезокоэффициент вязкости  $C = C_0 \cdot e^{-0,0092\Delta T}$ , (где  $C_0$  – при  $T = 20$  °С) отклонения составят  $\pm 2,5$  % и температурный коэффициент  $\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-0,0043\Delta T}$ , (где  $\gamma_0$  – при  $T = 30$  °С) отклонения составят  $\pm 1,3$  %.  $\Delta T$  – увеличение температуры от базового значения (на 20 °С) [6].

Согласно данным проведенных исследований среднее отклонение составит  $\pm 5$  % от действительных значений.

Зависимость изменения вязкости жидкостей ( $\mu$ ), от совместного воздействия давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ) имеет вид:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{CP - \gamma T}. \quad (6)$$

Изменение плотности жидкостей от совместного воздействия давления и температуры определяется:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b}}{1 + \beta \cdot T}, \quad (7)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения ( $T^{-1}$ ).

### Способы решения поставленной задачи

По данным работы [6] незначительность изменения плотности жидкости от температуры по сравнению с ее изменением от давления дает возможность в дальнейшем при расчетах в общем уравнении пропитки учитывать только зависимость изменения плотности от давления:  $\rho = \rho_0 \left( 1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right)$ . Тогда уравнение пропитки пористых тел вязкими средами под высоким давлением с нагревом примет вид:

$$\left\{ \frac{\frac{a}{b+P}}{1 - a \cdot \ln \frac{b+P}{b}} \cdot \left( 1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right) \right\} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu_0} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b}}{e^{(CP - \gamma T)}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (8)$$

**Физические характеристики пористой основы:** оксидная керамика (основа  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с коэффициентом проницаемости  $k = 1,26 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ , средним размером пор  $D_{cp} = 0,01 \text{ мм}$  и открытой пористостью  $\Pi = 22 \%$ . Основа ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) инертна – в процессе пропитки химически не взаимодействует с пропитывающими средами. Особой потребности в исследовании пористых тел с размером пор  $D_{cp} \sim 1 \text{ мм}$  – нет, по причине простоты их пропитки под высоким давлением с нагревом.

$k$  – величина постоянная – является геометрической характеристикой пористого тела и при его пропитке различными жидкостями не изменяется.

**Физические характеристики вязкой среды:** начальная вязкость  $\mu \sim 100 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , (одна из разновидностей битумных смол), коэффициенты сжимаемости (Тэйта)  $a$  и  $b$ , (4) будут определены ниже; пьезокоэффициент вязкости  $C = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$ , показывающий изменение вязкости среды от величины давления и температурный коэффициент вязкости  $\gamma = 0,074T^{-1}$ , показывающий изменение вязкости среды от температуры (выбраны как среднее значение аналогичных высокомолекулярных вязких сред по информации интернет изданий).

Смолы, получаемые от переработки нефти, при  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , как правило, находятся в твердом (аморфном) состоянии. Температура характерная для начала размягчения находится в пределах  $T \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . В дальнейшем процесс пропитки аналогичными средами производился и анализировался при  $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\mu = 11 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) и  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\mu = 2,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ). При этих температурах образцы могли полностью погружаться в смолу. При  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\mu = 51 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) погружение керамических образцов в смолу было затруднительно, поэтому в дальнейшем был проведен расчет пропитки «промоделированной» среды с параметрами исследуемой смолы при  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  и вязкостью  $\mu = 51 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Исследования по пропитке проводились с использованием опытно-промышленного гидростата (камеры высокого давления рассчитанной на давление  $700 \text{ МПа}$ ) с габаритами: внутренний диаметр –  $10 \text{ см}$ ; высота  $35 \text{ см}$ ; гидравлического пресса НРМ 400, усилием  $4 \text{ МН}$ , позволявшего создавать давление в камере до  $500 \text{ МПа}$ . Нагрев камеры вместе со смолой до соответствующих температур осуществлялся газовым нагревателем.

**Технологические параметры процесса:** максимальное гидростатическое давление –  $500 \text{ МПа}$ , скорость его увеличения (исследуемой среды) в гидростате  $v = 25 \text{ МПа/с}$ , выдержка под максимальным давлением –  $30 \text{ с}$ . Влияние скорости сброса давления в гидростате на разрушение пористых тел рассмотрено [1, 5] и в данной работе не рассматривается.

Коэффициенты сжимаемости различных сред  $a$  и  $b$  находят из решения системы 2-х уравнений Тэйта:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = a \cdot \ln \frac{b+P}{b}$$

Определение коэффициентов сжимаемости Тэйта для смолы проводили при температуре нагрева гидростата до  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_1}{V_0} &= a \cdot \ln \frac{b+P_1}{b}, \\ \frac{\Delta V_2}{V_0} &= a \cdot \ln \frac{b+P_2}{b}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  – изменение объема исследуемой жидкости при давлениях соответственно  $P_1$  и  $P_2$ ;

$V_0$  – начальный объем исследуемой жидкости.

Для битумных смол изменение объема  $\Delta V/V_0$ , при давлении  $P = 300 \text{ МПа}$  составит  $0,06$  (т. е.  $6 \%$ ), а при  $P = 500 \text{ МПа}$  –  $0,09$  (т. е.  $9 \%$ ). Решая систему 2-х уравнений (9) с двумя неизвестными  $a$  и  $b$ , определяем:  $a = 0,154$ ;  $b = 629 \text{ МПа}$ .

Изменение вязкости жидкости при различных высоких давлениях и температуре можно определить (если нет в литературных источниках) по предложенной автором методике [2].

Для каждой исследуемой температуры ( $40, 60$  и  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) вносим поправки в значения пьезокоэффициента вязкости ( $C$ ) и температурного коэффициента вязкости ( $\gamma$ ). Процесс, как указывалось выше, **изотермический**, т. е., должны вноситься изменения (по выше указанным рекомендациям) как по пьезокоэффициенту вязкости  $C = C_0 \cdot e^{-0,0092\Delta T}$ , так и по температурному коэффициенту вязкости  $\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-0,0043\Delta T}$ .

За точку отсчета по температуре берется значение  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , значение  $\gamma_0 = 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$ , тогда, для определения  $\gamma$  при  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\Delta T$  составит  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , для  $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\Delta T$  составит  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  и для  $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\Delta T$  составит  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  [6].

Данные пересчетов коэффициентов ( $C$ ) и ( $\gamma$ ) для смолы с учетом поправок приведены в таблице 1.

Выше обозначенные данные по пористому телу и вязкой среде (с учетом поправок  $C$  и  $\gamma$ , табл. 1) занесли в программу расчета (уравнение (8)) и по полученным данным строились графики распределения давления смолы по глубине пористого тела в зависимости от температуры и давления.

Необходимо отметить, что кривые 1 и 2 (рис. 1) – это «модельные» среды, но по всем физическим параметрам соответствующие смоле, при температурах нагрева  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  и приводятся только для сравнительного анализа.

Исходя из графиков расположения кривых 1–4 (рис. 1) отмечаем, что эффективность пропитки пористых тел вязкими средами с использованием температуры значительно возрастает.

**Таблица 1** – Изменение пьезокоэффициента вязкости  $C$  и температурного коэффициента вязкости  $\gamma$  с увеличением давления и температуры

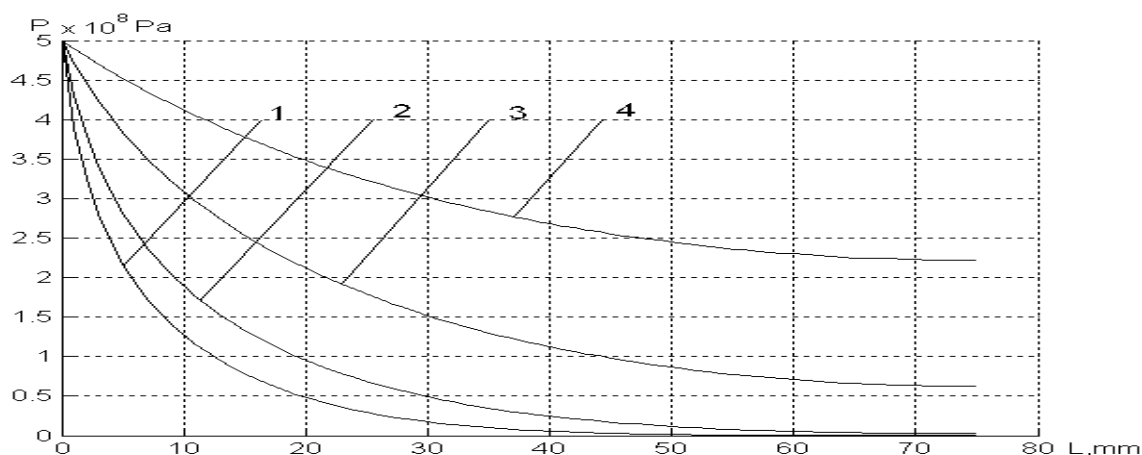
$T$ (°C)	30 °C		40 °C		60 °C		80 °C	
	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа <sup>-1</sup> )	$\gamma_0 \cdot 10^{-2}$ (Т <sup>-1</sup> )	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа <sup>-1</sup> )	$\gamma \cdot 10^{-2}$ (Т <sup>-1</sup> )	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа <sup>-1</sup> )	$\gamma \cdot 10^{-2}$ (Т <sup>-1</sup> )	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа <sup>-1</sup> )	$\gamma \cdot 10^{-2}$ (Т <sup>-1</sup> )
0	–	7,4	–	7,4	–	7,4	–	7,4
100	0,55	7,4	0,5	7,1	0,42	6,5	0,35	6,0
200	0,55	7,4	0,5	7,1	0,42	6,5	0,35	6,0
300	0,55	7,4	0,5	7,1	0,42	6,5	0,35	6,0
400	0,55	7,4	0,5	7,1	0,42	6,5	0,35	6,0
500	0,55	7,4	0,5	7,1	0,42	6,5	0,35	6,0

По расположению кривых (рис.1), отражающих процесс пропитки смолой пористого тела, можно отметить: кривая 1 – «моделируемая» среда ( $T = 30$  °C) – на 10 – мм глубины давление составит 141 МПа, на 20 мм глубины – 53 МПа, на 50 мм – менее 2 МПа и на 75 мм смола в порах тела будет отсутствовать. Кривая 2, так же «моделируемая» ( $T = 40$  °C) – пропитка пористого тела проходит не полностью, на 75 мм его глубины давление смолы составит 0,3 МПа, что будет соответствовать неполной пропитке (микропоры диаметром  $D \leq 3 \div 5$  мкм на участке  $60 \div 75$  мм будут не заполнены). Экспериментально было установлено, что для сред с начальной вязкостью ( $\mu_0 \div 10$  Па·с) пористое тело можно считать полностью пропитанным (все поры заполнены), если давление пропитывающей среды в средней его части было не менее 5 МПа. Кривая 3 ( $T = 60$  °C) – пропитка пористого тела проходит полностью, на 75 мм его глубины давление смолы – 62 МПа. И кривая 4 ( $T = 80$  °C) – пропитка пористого тела так же проходит полностью и на 75 мм глубины давление смолы составит 222 МПа.

При выборе оптимальных параметров технологического процесса пропитки пористых тел вязкими средами необходимо решать задачу: при одинаково затраченном времени на весь процесс пропитки в целом, что эффективнее – использовать минимальную скорость подъема давления до максимального значения ( $P_{max}$ ) и делать минимальную выдержку по времени под этим давлением; или создать максимально-возможную скорость подъема давления до  $P_{max}$  и далее делать максимальную выдержку по времени.

Для определения изменение давления вязкой среды по глубине пористого тела при неизменном времени всего процесса пропитки – 60 секунд, анализировалось влияние каждого из двух технологических факторов: скорость подъема давления в гидростате до  $P_{max} = 500$  МПа и время выдержки ( $t_{выд}$ ) под давлением  $P_{max}$ . Анализ осуществлялся по выше указанным технологическим параметрам процесса пропитки битумной смолой при температуре 60 °C.

По данным исследований строились графики (рис. 2).



**Рис. 1.** Кривые распределения давления вязкой среды по глубине пористого тела под давлением при различных температурах:  
1 –  $T = 30$  °C; 2 –  $T = 40$  °C; 3 –  $T = 60$  °C; 4 –  $T = 80$  °C

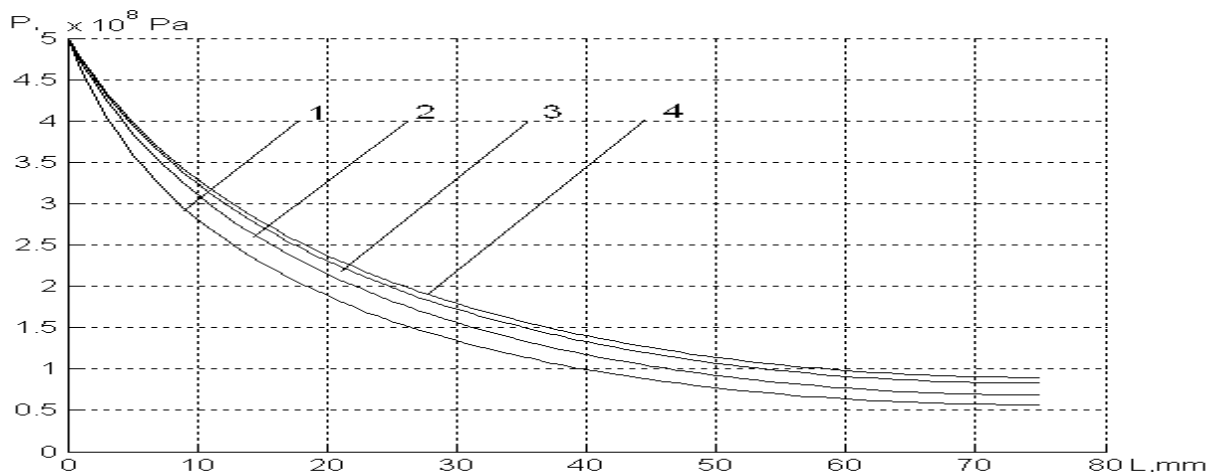


Рис. 2. Кривые распределения давления смолы по глубине пористого тела под давлением при различных технологических параметрах:

1 –  $t_{\text{выд}} = 0$  с,  $V_{\text{нд}} = 8,334$  МПа/с; 2 –  $t_{\text{выд}} = 20$  с,  $V_{\text{нд}} = 12,5$  МПа/с; 3 –  $t_{\text{выд}} = 40$  с,  $V_{\text{нд}} = 25$  МПа/с; 4 –  $t_{\text{выд}} = 50$  с,  $V_{\text{нд}} = 50$  МПа/с

Как видно из расположения кривых 1...4 (рис. 2), минимальное давление на 75 мм глубины – 56,8 МПа имеет кривая 1, отражающая процесс без выдержки по времени, т. е. скорость подъема давления до ( $P_{\text{max}}$ ) была минимальной и составляла –  $V_{\text{нд}} = 8,334$  МПа/с; 68,8 МПа имеет кривая 2, отражающая процесс с 20 секундной выдержкой при скорости подъема  $V_{\text{нд}} = 12,5$  МПа/с; 83 МПа – кривая 3 – выдержка составляла 40 секунд при скорости подъема  $V_{\text{нд}} = 25$  МПа/с; и 90 МПа – кривая 4 – выдержка максимальная = 50 секунд, при скорости подъема давления в гидростате  $V_{\text{нд}} = 50$  МПа/с.

Анализ вышеизложенных данных позволяет сделать заключение: для процессов пропитки пористых тел вязкими ( $\mu_0$  до 100 Па·с) средами – выдержка по времени под давлением необходима, в отличие от жидкостей, начальная вязкость которых  $\mu \leq 1$  Па·с.

Рассмотрим пропитку пористых тел легкоплавкими металлами и сплавами. В обычных условиях даже «мягкие» ( $\sigma_{BP} \sim 20$  МПа) металлы (свинец, ин-

дий, сурьма, олово, кадмий и др.) имеют значительный предел текучести ( $\sigma_T \sim 20$  МПа) и, при изостатических давлениях  $\sim 500$  МПа пропитка ими пористых тел будет невозможной – по причине деформирования или разрушения самого пористого тела [5]. Поэтому, наиболее надежным и качественным (без повреждения пористого тела) будет процесс пропитки этими металлами в расплавленном состоянии.

Далее проводим анализ применимости общего уравнения пропитки пористых тел вязкими средами с учетом температуры (8) к аналогичным процессам пропитки, но расплавами легкоплавких металлов и их сплавов, температура плавления которых не должна превышать 500 °С (чтобы не начался отпуск сталей, составляющих контейнер высокого давления).

Сжимаемость металлов под давлением незначительна ( $\sim 1\%$  на 1000 МПа) [9]. При величинах рассматриваемых давлений (до 500 МПа) нет необходимости учитывать в уравнении 8 (для расплавленных металлов и их сплавов) как сжимаемости, так плотно-

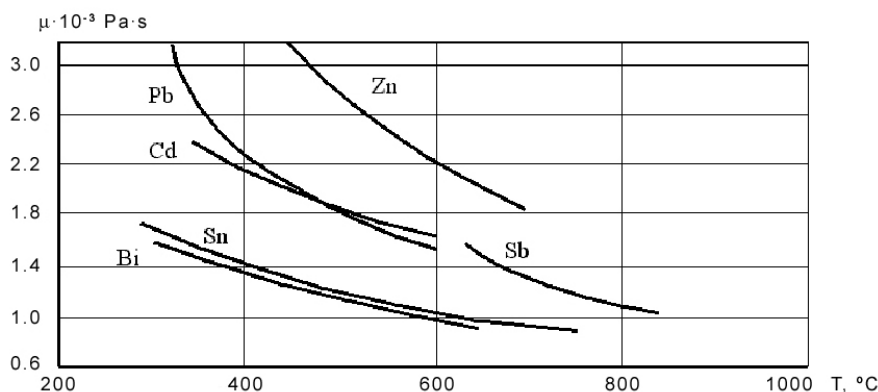


Рис. 3. Кривые изменения вязкости ряда металлов в зависимости от температуры

сти, а также их изменений от величины давления из-за их малости (отклонения результатов – десятые доли 1 %), поэтому в общем виде уравнение пропитки пористых тел жидкими легкоплавкими металлами и сплавами примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu_0} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{e^{\gamma \cdot T}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (10)$$

В таком виде уравнение 10 является нелинейным и описывает процесс изменения давления жидкого металла по глубине пористого тела с учетом изменения от температуры только вязкости. Но, как правило, технологически более рационально не с каждым разом нагревать многотоннограммовую камеру высокого давления, а один раз нагреть ее до нужной температуры и проводить процесс пропитки. Тогда уравнение 10 примет обычный линейный вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu^*} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (11)$$

где  $\mu^*$  – вязкость расплавленного металла при фиксированной температуре ( $T_\phi$ ).

Для успешной пропитки должно выполняться условие:  $T_\phi > T_n$  на 20...30 °С, где  $T_n$  – температура начала плавления выбранного для пропитки металла.

Примером пропитки пористых оснований жидким металлом может служить определение пористости методом ртутной порометрии. Этот метод аналогичен рассматриваемой задаче, в свою очередь, точность метода напрямую зависит от величины давления на ртуть при заполнении пор. В работе [10] приводятся данные по заполнению ртутью 2-х одинаковых пористых образцов: 1 – давление 100 кПа, заполнение 0,065 % объема ртути, отнесенного к объему образца; 2 – давление

1000 кПа, заполнение 0,125 % объема ртути, отнесенного к объему образца. Вывод только один: чем выше используемое давление пропитки, тем больше микропор будет заполнено.

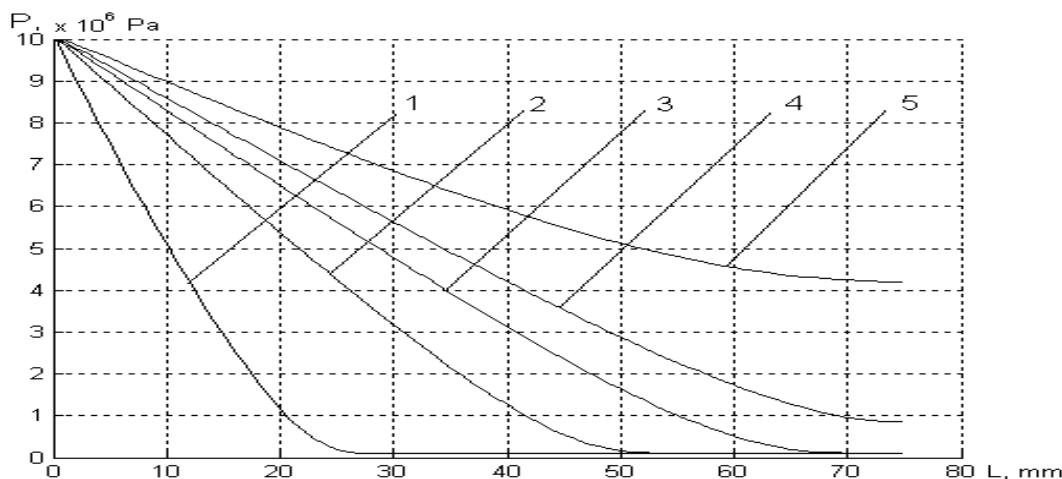
В данной задаче распределение давления жидкого металла в пористом теле будет зависеть только от 2-х факторов: коэффициента проницаемости  $k$  пористого тела и вязкости расплавленного металла ( $\mu^*$ ) при фиксированной температуре (рис. 3).

При одном и том же пористом теле  $k$  – для легкоплавких металлов может значительно отличаться от  $k$  для жидкостей (до 10 раз). Причиной тому могут быть: застойные участки, которые жидкости обходят, а металлы – нет; отличие в сдвиговых напряжениях в процессе течения у жидкостей и расплавленных металлов; различная сила сопротивления на границе поверхность поры – жидкость, возможны химические реакции с материалом самого тела, образование пленок на поверхности расплава металла и т. д.

В рассматриваемой задаче  $k = 1,26 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ , т.е. на порядок меньше, чем для вязких ( $\mu \geq 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) жидкостей. В качестве аналитического исследования пропитки пористых материалов легкоплавкими металлами и сплавами использовали олово:  $k = 1,26 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$  и  $\mu = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  при  $T = 400 \text{ °С}$  (рис. 3) [11].

Физические характеристики олова заносили в программу (уравнение (11)) и по данным расчетов строились графики распределения давления расплавленного олова по глубине пористого тела при различных по времени выдержках.

Экспериментально установлено, что если начальная вязкость у используемых жидкостей или расплавленных металлов  $\mu_0 \leq 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , то можно считать, что пропитка прошла полностью (все микропоры заполнены), при условии – в центре пропитываемого пористого тела давление среды должно быть не менее 1 МПа.



**Рис. 4.** Кривые распределения давления олова по глубине пористого тела под давлением 10 МПа при различных технологических выдержках:

1 –  $t_{\text{выд}} = 0 \text{ с}$ , 2 –  $t_{\text{выд}} = 30 \text{ с}$ , 3 –  $t_{\text{выд}} = 60 \text{ с}$ , 4 –  $t_{\text{выд}} = 90 \text{ с}$ , 5 –  $t_{\text{выд}} = 120 \text{ с}$ , для всех случаев – скорость увеличения давления –  $V_{\text{нд}} = \text{const} = 0,5 \text{ МПа/с}$

Необходимо отметить, при давлениях  $P \sim 10 \div 15$  МПа и выдержке под этим давлением 1÷3 минуты, заполнения микропор при пропитке будет 100 %. Чем больше давление, создаваемое в используемой установке, тем меньше габариты самой камеры высокого давления и тем дороже и ее стоимость, и эксплуатация.

В данном случае, при анализе данных (из решений уравнения (11)) при пропитке пористых тел расплавленными металлами можно с уверенностью утверждать, что при давлениях  $P_{\max} \sim 50$  МПа (с гарантией полного заполнения пор) общие габариты пористых тел подлежащих пропитке могут достигать до 0,5 м. При таких величинах давлений есть реальная возможность в создании гидростатов со значительными внутренними габаритами при минимальных затратах.

По расположению кривых 2–5 (рис. 4), при выше указанных параметрах процесса, можно отметить: выдержка по времени – 30 секунд – пропитка расплавленным оловом достигает 50 мм глубины (кривая 2); выдержка 60 секунд – глубина пропитки 65 мм (кривая 3); выдержка 90 секунд – пропитка полная (кривая 4); и при выдержке 120 секунд – пропитка всего образца с «гарантией» (кривая 5). Под «гарантией» подразумевается, что все газовые включения будут вытеснены и пустоты будут заполнены полностью.

#### При пропитке пористых тел расплавами металлов под давлением можно сделать ряд выводов:

1. Металлы в расплавленном состоянии по вязкости соизмеримы с жидкостями незначительной вязкости  $\mu \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$  Па·с, поэтому пропитку ими пористых тел можно производить под давлением значительно ниже исследуемых в данной работе.

2. Точность практических результатов и результатов математической модели (уравнение (11)) будет зависеть от точности определения коэффициент проницаемости  $k$  и вязкости расплавленного металла  $\mu^*$ .

3 В качестве исходных пористых тел могут использоваться: керамика, металлокерамика, металл с размером микропор  $D_{cp} = 0,01$  мм и менее.

#### Заключение

1. Предложена и проанализирована математическая модель пропитки пористых тел средами вязкостью  $\mu_0$  до 100 Па·с с учетом температурного фактора.

2. Даны рекомендации по коррекции пьезокоэффициента вязкости ( $C$ ) и температурного коэффициента вязкости ( $\gamma$ ) при использовании их в общей модели пропитки под давлением с нагревом (8).

3. На примере битумной смолы ( $\mu \sim 100$  Па·с) и олова ( $\mu_0 = 1,4 \cdot 10^{-3}$  Па·с, при  $T = 400$  °С) показано влияние температуры на степень пропитки пористого тела.

4. Установлено что, при одинаково затраченном времени процесса пропитки, более значимым из 2-х технологических параметров: (1-й, минимальная ско-

рость подъема давления до  $P_{\max}$ , но без выдержки по времени; и 2-й, максимальная скорость подъема давления, но с выдержкой под этим давлением) будет второй (рекомендуемое время выдержки – 1 ÷ 3 минуты).

5. На основе предложенных математических моделей пропитки под давлением с учетом температуры (8 и 11) можно рассчитывать оптимальные значения технологических факторов и определиться в выборе необходимого оборудования (гидростаты – высокие давления до 2000 МПа, но низкие температуры до 500 °С; газостаты – давление до 200 МПа, но температура до 2000 °С).

#### Список литературы

1. Косинский В. В. Математическое обоснование влияния основных технологических факторов на процессы пропитки недеформируемых пористых оснований вязкими средами под высоким давлением / В. В. Косинский // Порошковая металлургия. НАНУ. – 2009. – № 1/2. – С. 18–28.
2. Косинский В. В. Определение пьезокоэффициента вязкости различных жидкостей и их смесей при высоких давлениях / В. В. Косинский // Сб. научн. тр. Физика и техника высоких давлений. НАНУ, 2008. – Т. 18. – № 1. – С. 93–100.
3. Косинский В. В. Проникновение жидкостей в пористые тела под высоким давлением / Косинский В. В., Косинский В. Ф. // Сб. научн. тр. Физика и техника высоких давлений. АН УССР, № 34. – 1990. – С. 90–94.
4. Огибалов П. М. Нестационарное движение вязко-пластических сред. / Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. – М. : Изд-во Моск. ун-та. – 1977. – 373 с.
5. Косинский В. В. Разрушение пористых тел жидкостью под высоким давлением / В. В. Косинский // Проблемы прочности. АН УССР, 1991. – № 4. – С. 69–73.
6. Косинский В. В. Влияние температуры на свойства вязких сжимаемых жидкостей в процессе пропитки ими пористых тел под высоким давлением / В. В. Косинский // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2008. – № 1. – С. 52–56.
7. Золотых Е. В. Исследования в области высоких давлений. / Золотых Е. В., Бухаров Ю. Т., Кузнецов Д. Т. – М. : Комитет стандартов мер и измерительных приборов, 1969. – Вып. 104/1643. – 86 с.
8. Косинский В. В. Нелинейные законы Дарси и критерий Рейнольдса при течении сжимаемых жидкостей под высоким давлением в пористых телах / Косинский В. В. // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2007. – № 1. – С. 60–69.
9. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Малинин Н. Н. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.
10. Витязь П. А. Пористые порошковые материалы и изделия из них. / Витязь П. А., Капцевич В. М., Шелег В. К. – Минск : Высшая школа, 1987. – 164 с.
11. Кошкин Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. – М. : Наука, 1965. – 250 с.

Одержано 26.11.2010