

При транспортировке увлажненной формовочной смеси по конвейеру отсекали через каждые 5 сек порошковые пробы, помещая их в стандартные кюветы, выравнивая поверхностный слой. Затем каждую устанавливали в датчик (рис. 1), просвечивая гамма-излучением ^{137}Cs и регистрируя поток проникающего излучения (N_o). Рассчитав отношение $\frac{N_o}{N_a}$, равенству (10) определяли со-

держание влаги. Измерение и расчет настроечного параметра выполняли ежедневно перед началом экспресс-анализа. Продолжительность анализа влажности одной пробы с учетом отбора составила 1,5-2 мин.

В заключение следует отметить, что ядерно-физический способ оказался наиболее эффективным при оценке влажности формовочной смеси. Применимость его в промышленном варианте позволила оптимизировать технологический процесс увлажнения и снизить количество бракованной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровский Ю. Ф., Шацких М. И. Формовочные и стержневые смеси. Л.: Машиностроение, 1980. 85 с.
2. Гусев Н. Г., Машкович В. П., Обвинцев Г. В. Гамма-излучение радиоактивных изотопов и продуктов деления. М.: Физматгиз, 1959. 180 с.

Игорь Григорьевич ТЕЛЕГИН —
старший научный сотрудник лаборатории
гидродинамических методов ПНП

Тюменского филиала ООО «КогалымНИПИнефть»,
кандидат физико-математических наук, доцент

Олег Борисович БОЧАРОВ —
старший научный сотрудник

Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
кандидат физико-математических наук, доцент

УДК 532.546: 949.8

СОПРЯЖЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ*

АННОТАЦИЯ. В одномерном случае исследовались задачи сопряжения модели фильтрации несмешивающихся и несжимаемых жидкостей Маскета-Левретта (МЛ-модель) с различными фазовыми давлениями и модели Баклея-Левретта (БЛ-модель) с общим давлением для обеих фаз. В данной работе анализируются три подхода к решению этой проблемы в двумерном случае, проводится численный анализ влияния сопряжения на характеристики процесса вытеснения нефти водой.

In an one-dimensional case problems of conjunction of model of a filtration of not mixing up and incompressible liquids Muskat-Leverett (ML-model) with various phase pressure and models Backley-Leverett (BL-model) with common

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке СО РАН (интеграционный проект № 117).

pressure for both phases were investigated. In the given work three approaches to a solution of this problem in a two-dimensional case are analyzed, the numerical analysis of influence of conjunction on performances of process displacement of oil by water will be carried out.

1. Постановка задачи

Модель Маскета-Левретта в отсутствии массовых сил в однородном грунте имеет следующий вид [3]:

$$\begin{cases} m \frac{\partial s}{\partial t} = \operatorname{div}(-k_0 a_0 p_{cs} \nabla s - \bar{Q} b) \equiv -\operatorname{div}(\bar{v}_1), \\ -\bar{Q} \equiv \operatorname{div}(k_0 (k_3 \nabla p)) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время, $s = (s_1 - S_1^0) / (1 - S_1^0 - S_2^0)$ — динамическая насыщенность смачивающей фазы (воды), s_i — истинная насыщенность i -фазы ($i=1$ — воды, $i=2$ — нефти), $(S_1^0, S_2^0) = \text{const}$ — остаточные водо- и нефтенасыщенности, $p \in [p_1, p_2]$ — среднее давление, имеющее вид:

$$p = p^* + \int_s^1 b(z) \frac{\partial p_c(\bar{x}, z)}{\partial z} dz,$$

k_0 — абсолютная проницаемость нефтяного коллектора, $m = m_0 (1 - S_1^0 - S_2^0)$, m_0 — пористость породы, $a_0(s) = k_2 b / \mu_2$, $p_c(s) = (m_0 / k_0)^{1/2} j \gamma$ — капиллярное давление, γ — коэффициент поверхностного натяжения, $j(s)$ — функция Левретта, $b(s) = k_1 / (k_1 + \mu k_2)$ — коэффициент подвижности вытесняющей фазы, $k_i(s)$ — относительные фазовые проницаемости, $k_3(s) = k_1 / \mu_1 + k_2 / \mu_2$, $\mu = \mu_1 / \mu_2$, μ_i — вязкости фаз, p^* — давление в нефти, $\bar{Q} = (Q_1, Q_2)$ — расход смеси, \bar{v}_1 — вектор скорости фильтрации вытесняющей фазы, ρ_i — плотности. Действие оператора дивергенции производится по $\bar{x} = (x, y)$, $x \in [0, L_1]$ и $y \in [0, L_2]$.

Для БЛ-модели система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m \frac{\partial s}{\partial t} = \operatorname{div}(-\bar{Q} b)_x \equiv -\operatorname{div}(\bar{v}_1), \\ -\bar{Q} \equiv \operatorname{div}(k_0 k_3 \nabla p) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Предполагается, что пористый скелет однороден $k_0 = \text{const}$, $m = \text{const}$, $L_1 = L_2$ и гравитационные силы не учитываются.

Обезразмеривая уравнения (1) и (2), введем переменные: $\bar{x} = (x / L_1, y / L_1)$, $\bar{t} = t Q_0 / (m L_1)$, $\bar{p} = (p - p_1) / (p_2 - p_1)$, $\bar{Q} = (Q_1 / Q_0, Q_2 / Q_0)$, $\bar{v}_1 = (\bar{v}_{11} / Q_0, \bar{v}_{12} / Q_0)$, $Q_0 = k_0 (p_2 - p_1) / (\mu_2 L_1)$ — характерный расход. Тогда уравнения (1), (2) запишутся в виде (волну над безразмерными переменными в дальнейшем опускаем):

$$\begin{cases} s_t = \operatorname{div}(\varepsilon a \nabla s - \bar{Q} b) \equiv -\operatorname{div}(\bar{v}_1), \\ \operatorname{div}(d \nabla p) = 0, \bar{Q} \equiv -d \nabla p, \end{cases} \quad (3)$$

где $\varepsilon = \gamma(m_0/k_0)^{1/2} / (Q_0 L_1 \mu_2)$, $a(s) = -k_2 b j_s$, $d(s) = k_1 / \mu + k_2$, значению параметра $\varepsilon = 0$ будет соответствовать БЛ-модель.

Задача вытеснения рассматривается в цилиндре $\Omega = \{(x, y, t) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, t \geq 0\}$, с границей Γ .

2. Задача сопряжения МЛ- и БЛ-моделей

Рассмотрим случай расположения нагнетательной скважины в нижнем левом углу, а эксплуатационной скважины в правом верхнем углу. Это соответствует элементу симметрии при 5-точечной схеме заводнения пласта. Нагнетательная скважина моделируется участками нагнетания Γ_1 : $x \in [0, X_1]$, $y = 0$ и $x = 0$, $y \in [0, Y_1]$. Добывающая скважина моделируется участками отбора Γ_2 : $x \in [X_1, 1]$, $y = 1$ и $x = 1$, $y \in [Y_2, 1]$. Для системы (3) будем рассматривать следующую начально-краевую задачу:

$$\begin{aligned} s|_{\bar{x} \in \Gamma_1} = 1, \varepsilon a \nabla s|_{\bar{x} \in \Gamma_2} = 0, \bar{v}_1 \cdot \bar{n}|_{\bar{x} \in \Gamma \setminus (\Gamma_1 \cup \Gamma_2)} = 0, s|_{t=0} = s_0(\bar{x}); \\ p|_{\bar{x} \in \Gamma_1} = 1, p|_{\bar{x} \in \Gamma_2} = 0, \bar{Q} \cdot \bar{n}|_{\bar{x} \in \Gamma \setminus (\Gamma_1 \cup \Gamma_2)} = d \frac{\partial p}{\partial \bar{n}}|_{\bar{x} \in \Gamma \setminus (\Gamma_1 \cup \Gamma_2)} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначим область, где происходит фильтрация по БЛ-модели через: $\Omega_b = \{(x, y, t) | X_3 < x \leq 1, Y_3 < y \leq 1, t \geq 0\}$, границей данного цилиндра будет линия Γ_b . Предполагалось, что $\Gamma_2 \subset \Gamma_b$. Введем также $\Omega_m = \Omega \setminus \Omega_b$ — область, где происходит фильтрация по МЛ-модели, граница этой области — Γ_m . Линией склейки МЛ- и БЛ-моделей будет $\Gamma_{mb} = \Gamma_m \cap \Gamma_b$. На Γ_{mb} , в случае гладкой функции $s(\bar{x}, t)$, должно выполняться равенство $a \nabla s|_{\bar{x} \in \Gamma_{mb}} = 0$ и поэтому задача нахождения водонасыщенности распадается на две задачи в цилиндрах Ω_m и Ω_b :

$$\begin{aligned} s_t = \operatorname{div}(\varepsilon a \nabla s - \bar{Q} b); s|_{t=0} = s_0(\bar{x}), \bar{x} \in \Omega_m; s|_{\bar{x} \in \Gamma_1} = 1, \\ a \nabla s|_{\bar{x} \in \Gamma_{mb}} = 0, \bar{v}_1 \cdot \bar{n}|_{\bar{x} \in \Gamma_m \setminus (\Gamma_1 \cap \Gamma_{mb})} = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$s_t = \operatorname{div}(-\bar{Q} b); s|_{t=0} = s_0(\bar{x}), \bar{x} \in \Omega_b; s|_{\bar{x} \in \Gamma_{mb}} = S(\bar{x}, t), \quad (6)$$

функция $S(\bar{x}, t) = s(\bar{x}, t)|_{\bar{x} \in \Gamma_{mb}}$ определяется из решения $s(\bar{x}, t)$ задачи (5).

В работе [1] в одномерном случае был предложен и исследован специальный метод сопряжения моделей двухфазной фильтрации, заключающийся в смене эволюционной переменной для БЛ-модели. В двумерном случае (с использованием одномерного подхода) задача (6) принимает вид:

$$\operatorname{div}(\bar{Q} v) + \varphi_t(v) = 0; v|_{t=0} = v_0(\bar{x}), \bar{x} \in \Omega_b; v|_{\bar{x} \in \Gamma_{mb}} = V(\bar{x}, t), \quad (7)$$

где функция $s = \varphi(v) = b^{(-1)}(v)$ — функция обратная к $v = b(s)$, $v_0(\bar{x}) = b[s_0(\bar{x})]$, $V(\bar{x}, t) = b[S(\bar{x}, t)]$. С целью упрощения численной реализации проводилась регуляризация функции φ_v .

Задачу (5), (6) будем называть s-склейкой, задачу (5), (7) соответственно v-склейкой. В работе [2] для сопряжения фильтрационных моделей рассматривался также метод сквозного счета задачи сопряжения. Этот способ применительно к двумерному случаю приводит к рассмотрению во всей области Ω для нахождения водонасыщенности системы уравнений (3) с разрывной функцией $\varepsilon(\bar{x})$, имеющей вид:

$$\varepsilon(\bar{x}) = \begin{cases} \varepsilon, x \in \Omega_m; \\ 0, x \in \Omega_b. \end{cases}$$

3. Особенности численной реализации

Так как нагнетательная скважина располагалась в нижнем левом углу, добывающая скважина в верхнем правом, а пласт однороден, то проекции вектора суммарной скорости фильтрации \bar{Q} к Γ_{mb} со стороны Ω_m положительны. Это делает возможным постановку задач для v- и s-склеек и упрощает построение разностных схем. В случае неоднородных пластов направление \bar{Q} может быть весьма разнообразным и в таких условиях неопределенны задачи в Ω_b для v- и s-склеек.

Введем в цилиндре Ω сетку с распределенными узлами

$\Omega_{h_1 h_2} = \{x_{ij} = (ih_1, jh_2), t_n = n\tau; i = \overline{0, N_1}, j = \overline{0, N_2}, n = 0, 1, 2, \dots\}$, $h_1 = 1/N_1$ и $h_2 = 1/N_2$ — шаги по пространственным координатам, $\tau = Kh_1^2$ — шаг по времени.

Для нахождения численного решения использовались противопотоковые схемы первого порядка аппроксимации [4] из соображений необходимости вычислять $s(\bar{x}, t)$ на линиях склейки без привлечения дополнительных узлов сетки, а также для соблюдения балансовых соотношений. Шаги h_1 и h_2 брались равными 0.02 ($N_1 = N_2 = 50$), а $\tau = 0.00016$ ($K = 0.4$).

Уравнение МЛ модели аппроксимировалось с помощью полунявной разностной схемы с покоординатным расщеплением, $\bar{Q} = (u, w)$:

$$\frac{s_{ij}^{n+1/2} - s_{ij}^n}{0.5\tau} = \frac{\varepsilon}{h_1} (a_{i+1/2j}^n s_{x,ij}^{n+1/2} - a_{i-1/2j}^n s_{\bar{x},ij}^{n+1/2}) - (ub)_{\bar{x},ij}^n + \frac{\varepsilon}{h_2} (a_{ij+1/2}^n s_{y,ij}^n - a_{ij-1/2}^n s_{\bar{y},ij}^n) - (wb)_{\bar{y},ij}^n \quad (8)$$

$$\frac{s_{ij}^{n+1} - s_{ij}^{n+1/2}}{0.5\tau} = \frac{\varepsilon}{h_1} (a_{i+1/2j}^{n+1/2} s_{x,ij}^{n+1} - a_{i-1/2j}^{n+1/2} s_{\bar{x},ij}^{n+1}) - (ub)_{\bar{x},ij}^{n+1/2} + \frac{\varepsilon}{h_2} (a_{ij+1/2}^{n+1/2} s_{y,ij}^{n+1/2} - a_{ij-1/2}^{n+1/2} s_{\bar{y},ij}^{n+1/2}) - (wb)_{\bar{y},ij}^{n+1/2}$$

Для уравнения БЛ модели (6) применялась аналогичная схема, но с $\varepsilon = 0$. Расчет уравнения (7) проводился по схеме:

$$u_{i-1/2j}^n \frac{v_{ij}^{n+1/2} - v_{ij-1}^{n+1/2}}{h_1} + w_{ij-1/2}^n \frac{v_{ij}^n - v_{ij-1}^n}{h_2} + \varphi_{vij}^n \frac{v_{ij}^{n+1/2} - v_{ij}^n}{0.5\tau} = 0;$$

$$u_{i-1/2j}^n \frac{v_{ij}^{n+1/2} - v_{ij-1}^{n+1/2}}{h_1} + w_{ij-1/2}^n \frac{v_{ij}^{n+1} - v_{ij-1}^{n+1}}{h_2} + \varphi_{vij}^{n+1/2} \frac{v_{ij}^{n+1} - v_{ij}^{n+1/2}}{0.5\tau} = 0; \quad (9)$$

Эллиптическое уравнение для расчета давления решалось неявным методом установления по схеме переменных направлений:

$$\delta \frac{p_{ij}^{n+1/2} - p_{ij}^n}{0.5\tau} = \frac{1}{h_1} (d_{i+1/2j}^n p_{x,ij}^{n+1/2} - d_{i-1/2j}^n p_{\bar{x},ij}^{n+1/2}) + \frac{1}{h_1} (d_{ij+1/2}^n p_{y,ij}^n - d_{ij-1/2}^n p_{\bar{y},ij}^n); \quad (10)$$

$$\delta \frac{p_{ij}^{n+1} - p_{ij}^{n+1/2}}{0.5\tau} = \frac{1}{h_1} (d_{i+1/2j}^n p_{x,ij}^{n+1/2} - d_{i-1/2j}^n p_{\bar{x},ij}^{n+1/2}) + \frac{1}{h_1} (d_{ij+1/2}^n p_{y,ij}^{n+1} - d_{ij-1/2}^n p_{\bar{y},ij}^{n+1});$$

в численных расчетах бралось δ равное 0.3. Уравнение (10) решалось итерационно, точность взята равной 0.0005, среднее количество итераций оказалось в пределах 1-3.

Поле скорости определялось из закона Дарси:

$$u_{i+1/2j}^{n+1} = -d_{i+1/2j}^n p_{\bar{x},ij}^{n+1}, w_{ij+1/2}^{n+1} = -d_{ij+1/2}^n p_{\bar{y},ij}^{n+1}. \quad (11)$$

Системы нелинейных уравнений для s, v линеаризовывались с помощью метода простой итерации, полученные системы линейных уравнений решались методом правой прогонки. На нечетных временных слоях производилась смена последовательности вычисления по разным осям, то есть вначале производился расчет по оси OY , а потом по оси OX .

Контроль разностного решения осуществлялся с помощью определения основных характеристик процесса вытеснения: обводненности $\eta(t) = 100\% \int_0^1 \int_0^1 s(\bar{x}, t) dx dy$, положение изосат $\bar{x}_c(t)$ — фронтовой водонасыщенности в БЛ-модели s_c . Также контролировался фронт распространения смачивающей фазы $\bar{x}_f(t)$, для удобства отображения изосат считалось, что при $s < 0.0001$ фронт воды не дошел до данной точки.

4. Результаты расчетов

В численных расчетах были взяты параметры:

$$k_1 = s^2; k_2 = (1-s)^2; j = (1-s)/(0.9+s); s^* = 0.05; X_1 = Y_1 = 0.04; X_2 = Y_2 = 0.96$$

На рисунках толстыми линиями обозначены решения или характеристики, относящиеся к модели сопряжения, а тонкими — контрольные профили расчета по МЛ-модели во всей области Ω , пунктиром указана граница Γ_{mb} — линия сопряжения моделей. Светлыми квадратиками указаны точки $(X_1, 0)$, $(0, Y_1)$, темными кружками точки $(X_2, 0)$, $(0, Y_2)$.

а) Различные методы сопряжения. В целом методы сопряжения v-склейки, s-склейки и метод сквозного счета дали очень сходные результаты, только метод v-склейки дает большую погрешность при малых $s_0(\bar{x})$, за счет $\phi'_v(\bar{x}) \gg 1$. Поэтому все методы анализировались с точки зрения оптимальности. Метод v-склейки сложен при реализации и менее экономичен, метод сквозного счета прост при численной реализации и экономичен. Так, в табл. 1 представлено время, затраченное на компьютере с процессором Pentium 4 с тактовой частотой 2.0 GHz на расчет задачи сопряжения при $X_3 = Y_3 = 0.5$, для разных методов на момент времени $T = 0.5$.

Таким образом, наиболее оптимальным можно назвать метод сквозного счета задачи сопряжения и в дальнейшем именно этот метод будет рассматриваться как основной.

Таблица 1

Время расчета задач в секундах

Название расчета	Время счета, с
контрольный расчет по МЛ модели	24.3
s-склейка	19.9
v-склейка	23.8
сквозной счет	22.1

б) Особенности решений задачи сопряжения. Характерной особенностью решения задачи сопряжения является более сильное вытягивание языка водонасыщенности в сторону расположения нагнетательной скважины. Это объясняется отсутствием в области действия БЛ-модели капиллярных сил, растягивающих фронт водонасыщенности, рис. 1 ($\epsilon = 0.5, \mu = 0.1, T = 0.75$).

Вторым характерным отличием является эффект недобегания, выражающийся в торможении изосат $s(\bar{x}, t)$ меньших 0.2. Из рисунка видно, что изосаты 0.2 и 0.3 сильно вытянуты в сторону добывающей скважины, в то же время изосата $s=0.1$ движется более медленно. В области действия МЛ-модели различия между решениями относительно невелики. На рис. 2 приведены соответствующие рисунку 1 графики для $s(\bar{x}, T)$ при $x=y$. Из рисунка видно, что вытягивания изосат, в области Ω_b , имеет место поднятие профиля водонасыщенности (формирование разрывного решения, характерного для БЛ-модели). Из-за вытягивания изосат обводненность пласта в задаче сопряжения после прихода воды на эксплуатационную скважину выше.

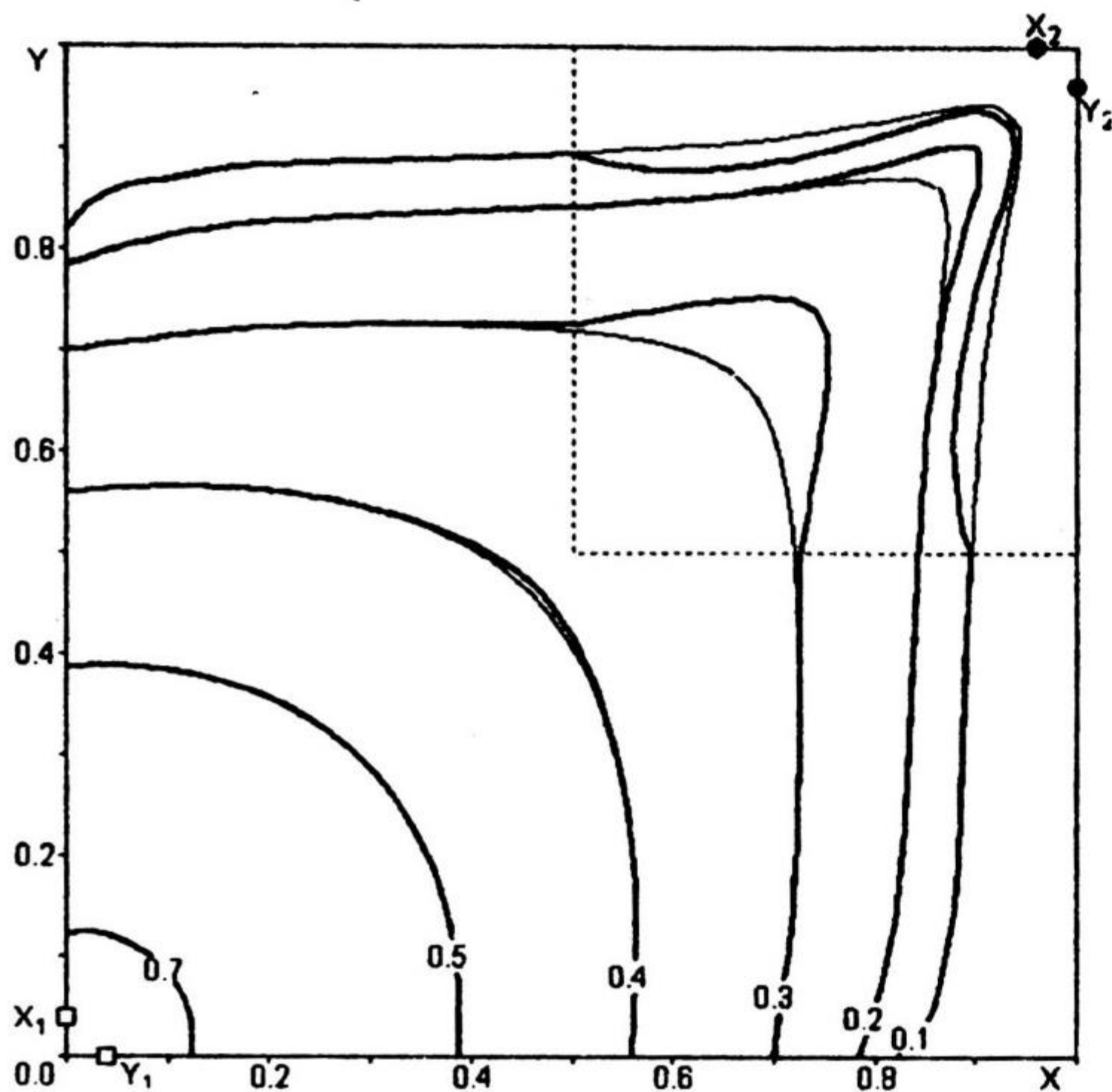


Рис. 1. Сопряжение МЛ-БЛ, сравнение с МЛ

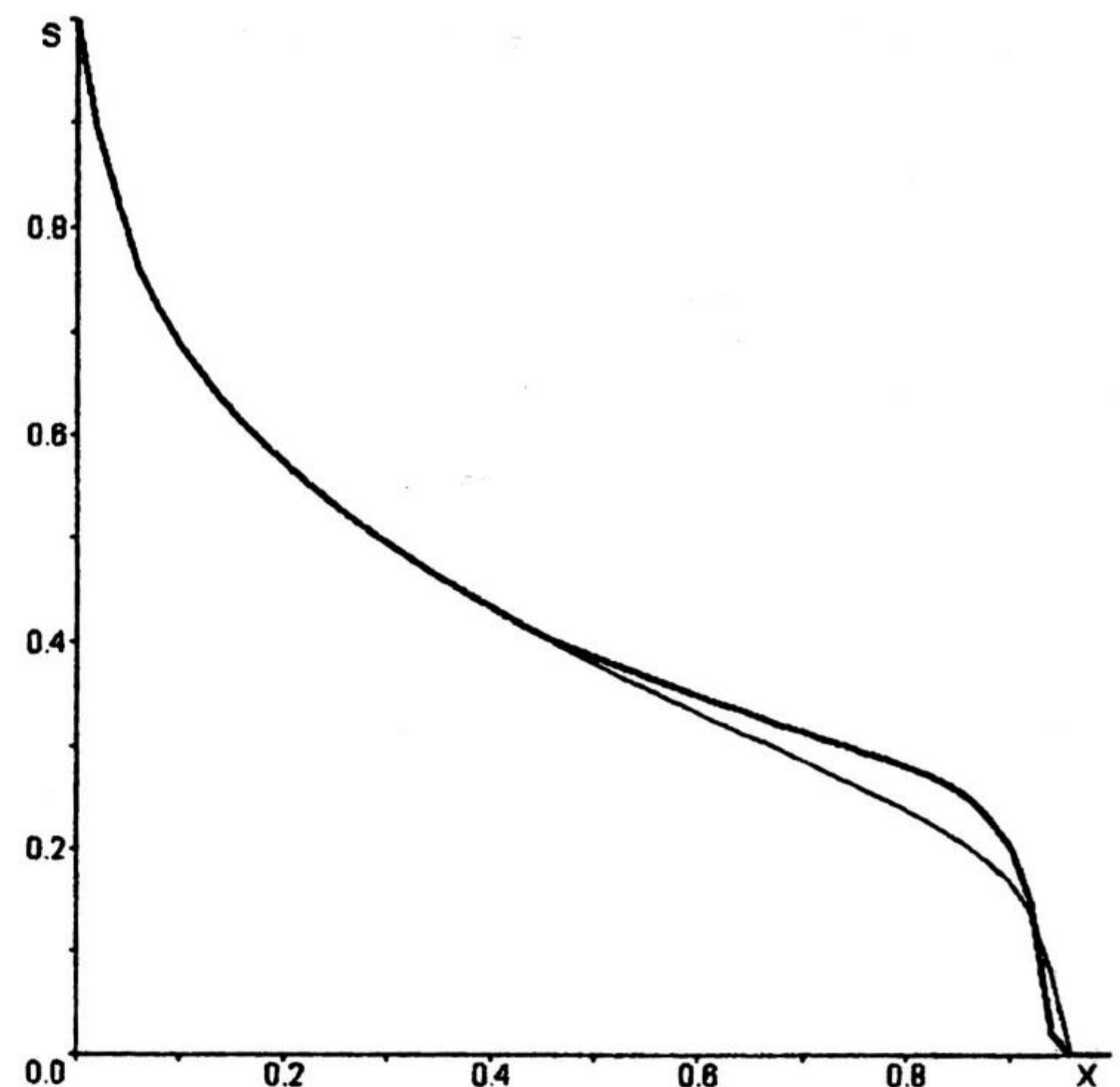


Рис. 2. Зависимости на диагонали, к рис. 1

в) Особенности движения изосат $\bar{x}_c(t)$ и $\bar{x}_f(t)$. На рис. 3 в условиях, соответствующих рис. 1, приведены изосаты движения $\bar{x}_c(t)$ на разные моменты времени. Из рисунка можно определить три фазы в поведении фронта для задачи сопряжения. В первой фазе изосаты в задаче сопряжения и по МЛ-модели во всей области совпадают. На второй происходит резкое ускорение продвижения $\bar{x}_c(t)$ (он догоняет $\bar{x}_f(t)$) с формированием хорошо выраженного «языка» в сторону добывающей скважины. На рис. 4 приведены положения фронта $\bar{x}_f(t)$ на разные моменты времени. На графике для задачи сопряжения выделяются два участка, соответствующие областям Ω_m и Ω_b .

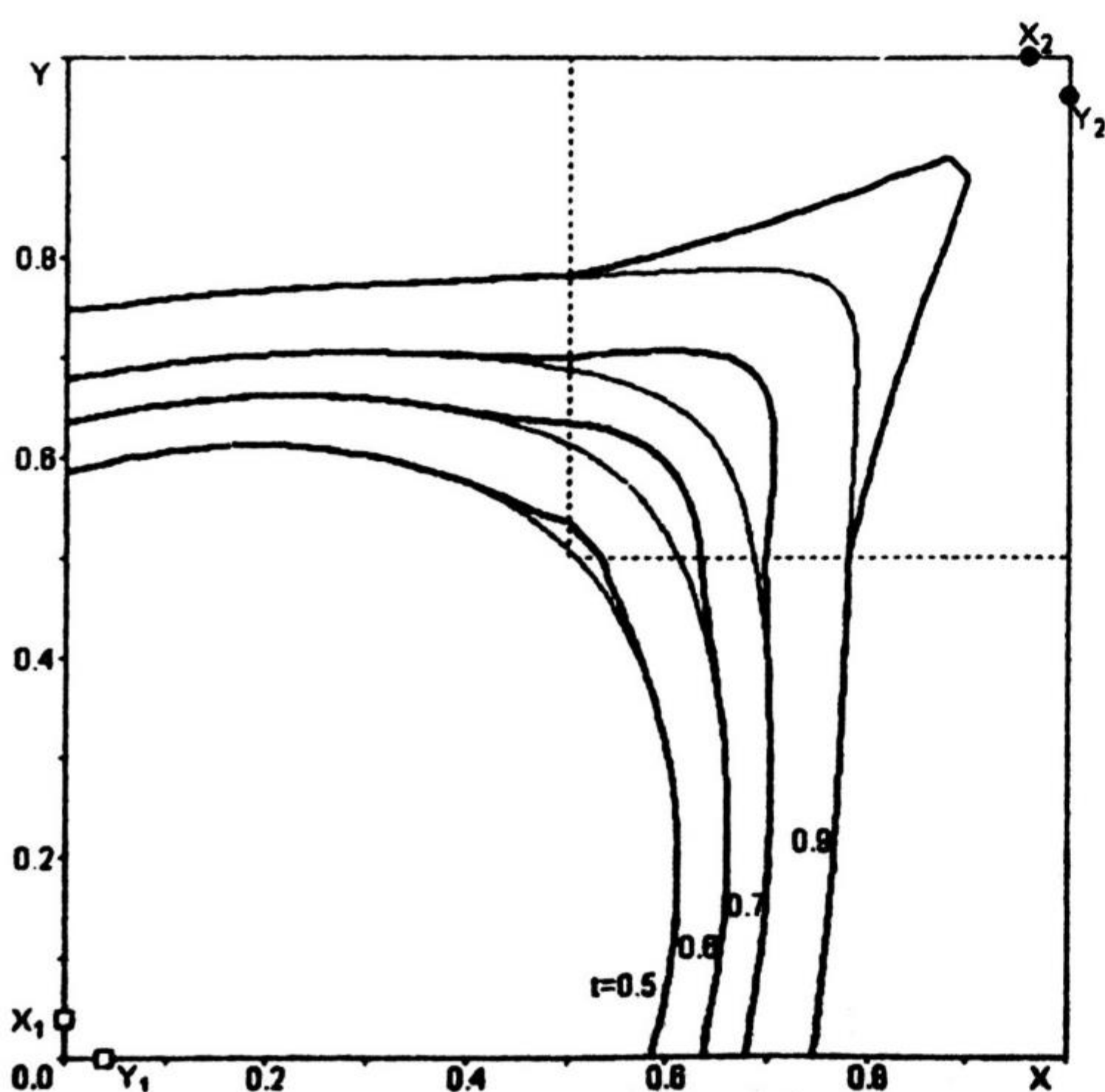


Рис. 3. Изосаты $\bar{x}_c(t)$, сравнение с МЛ

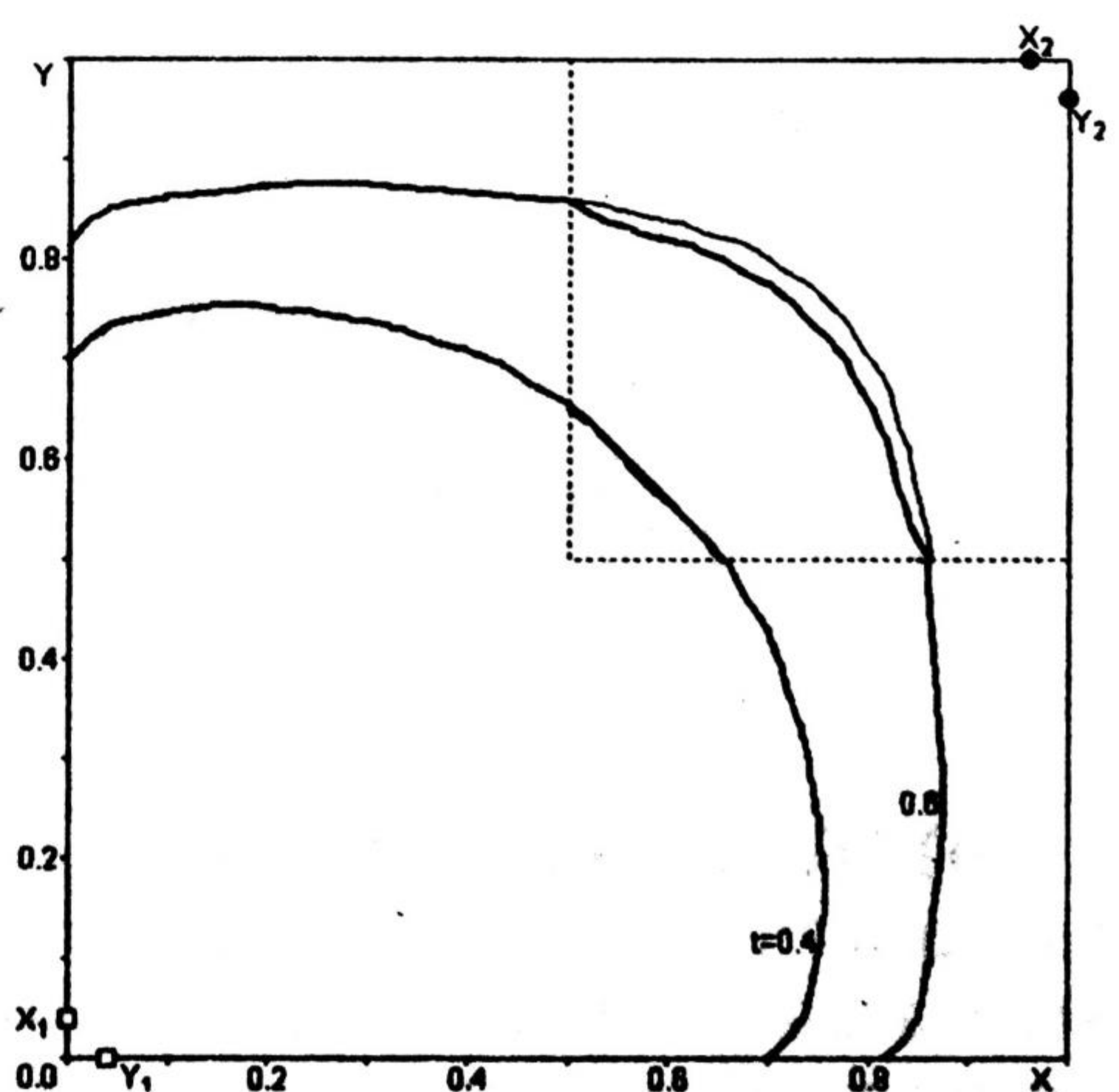


Рис. 4. Изосаты $\bar{x}_f(t)$, сравнение с МЛ

г) **Влияние размеров области решения БЛ-модели.** Серьезно влияет на структуру решения размер области Ω_b . Проводились расчеты при разных $Y_3 = X_3$. Оказалось, что разница между решениями по задаче сопряжения и по МЛ модели при $X_3 \geq 0.9$ мала и графически почти не заметна.

д) **Влияние параметров ε и μ на решение.** Очевидным является то, что при уменьшении ε уменьшаются и различия между решениями, естественно, уменьшается при этом и дисбаланс обводненности. Более сложное влияние на решение оказывает параметр μ . В табл. 2 указаны дисбалансы обводненности и максимальные дисбалансы при $\varepsilon = 0.5$, $Y_3 = X_3 = 0.5$ и $t = T$.

Таблица 2

Сводная таблица по дисбалансам при разных μ

μ	S_c	Дисбаланс при $t = T$	Максимальный дисбаланс до $t = T$	T
0.05	0.2182	0.20	0.20	1
0.1	0.3015	0.12	0.24	1
0.5	0.5773	1.08	1.08	2

На рис. 5 представлены изолинии $s(\bar{x}, T) = const$ на момент времени $t = 2.5$ при $\varepsilon = 0.5$ и $\mu = 0.5$. Соответствующие графики $\eta(t)$ изображены на рис. 6. Из рис. 5 видно, что отличия между решениями весьма существенны и даже затрагивают область Ω_m .

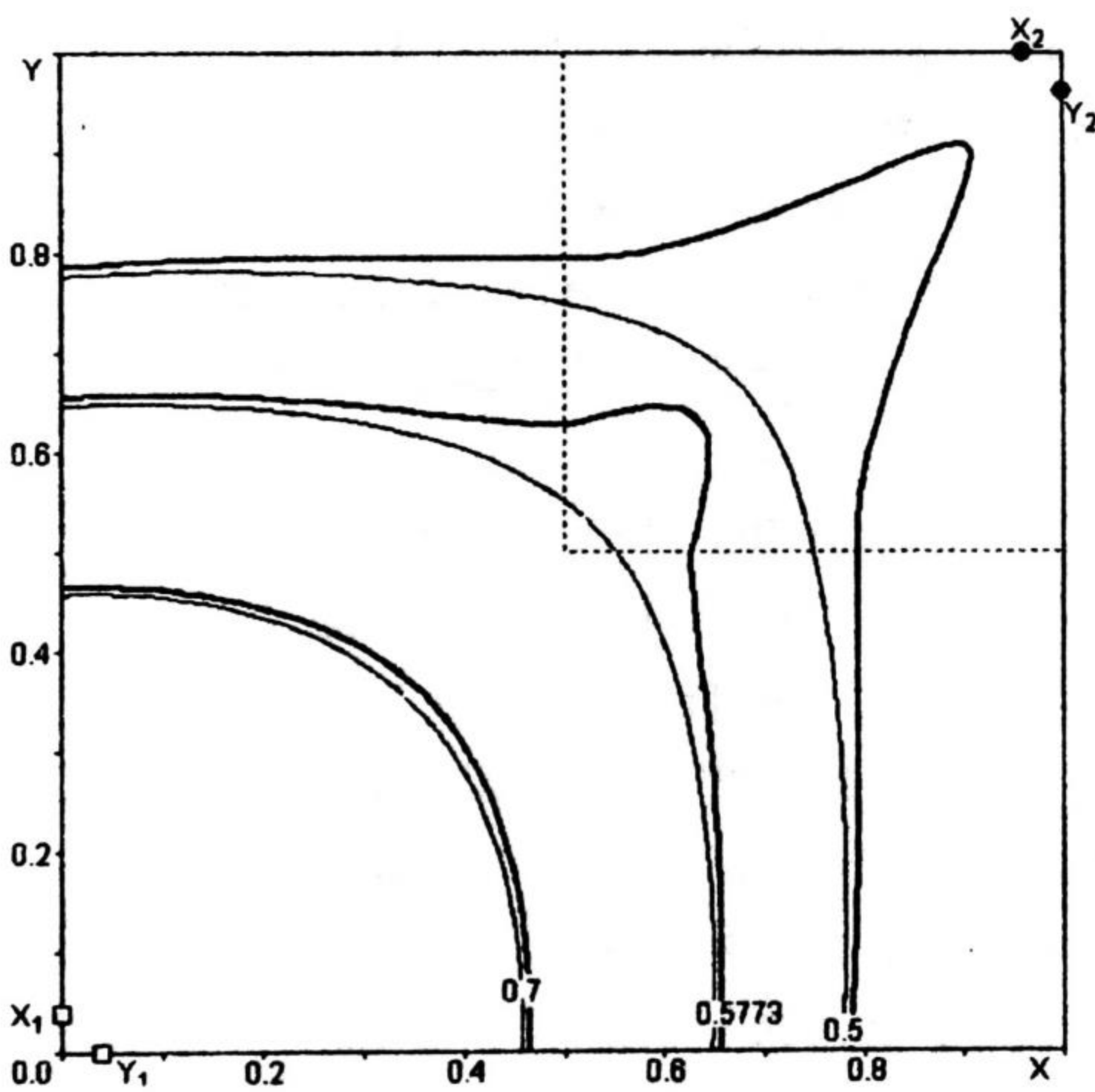


Рис. 5. Сопряжение МЛ и БЛ при $t = 3$, $\varepsilon = 0.5$, $\mu = 0.5$

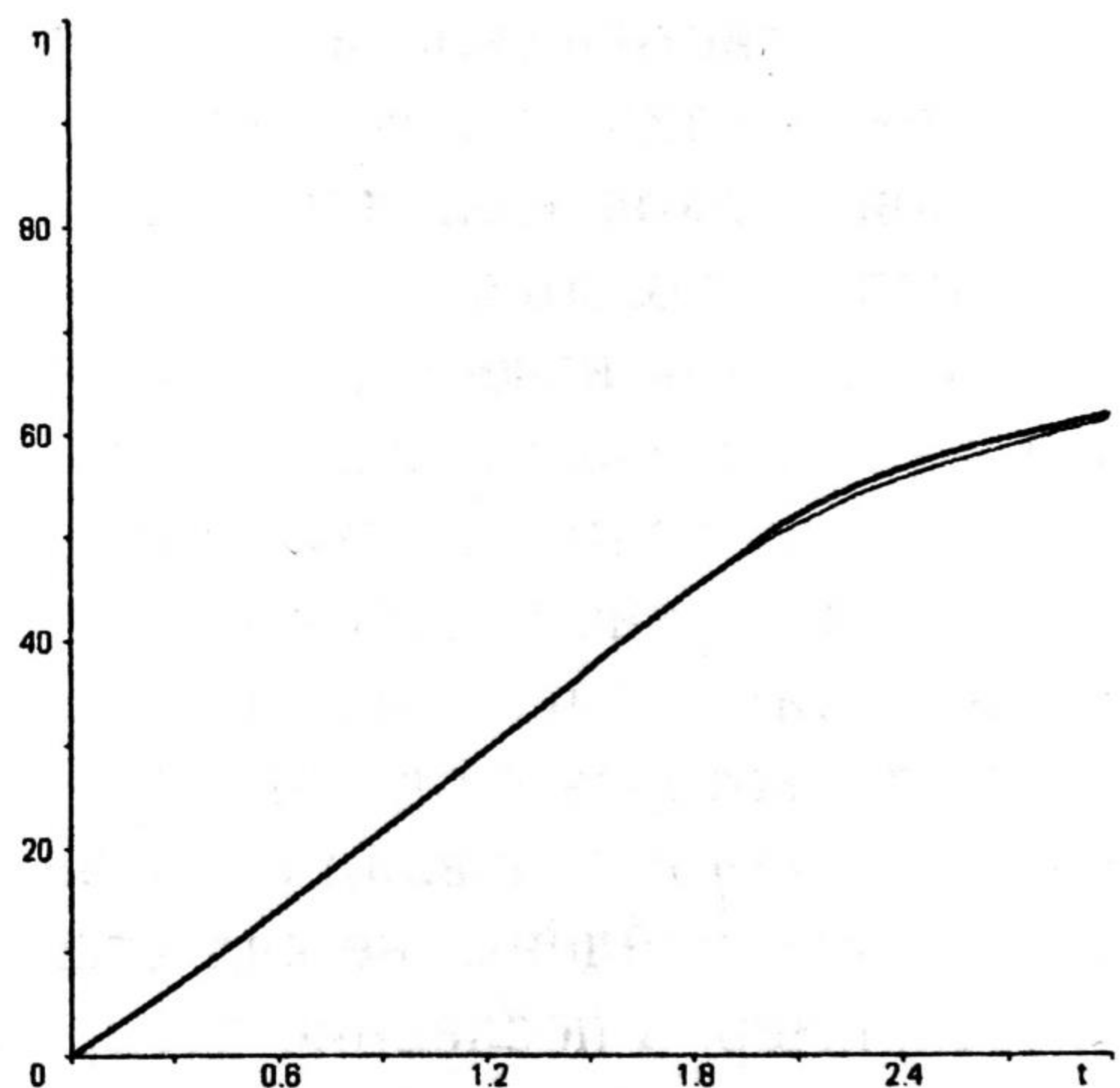


Рис. 6. Зависимости $\eta(t)$ к рисунку 5

5. Заключение

Как показали численные эксперименты, применение модели сопряжения актуально при больших ε (больше 0.1) и больших площадях Ω_b (Ω_b должно составлять не менее 5% от площади Ω).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монахов В. Н. Сопряжение основных математических моделей фильтрации двухфазной жидкости // Математическое моделирование. 2002. Том 14. № 40. С. 109-115.
2. Бочаров О. Б., Телегин И. Г. Численный анализ некоторых методов сопряжения двух моделей фильтрации несмешивающихся жидкостей // Вычислительные технологии. 2002. Том 7. № 5. С. 11-20.

3. Антонцев С. Н., Кажихов А. В., Монахов В. Н. Краевые задачи механики неоднородных жидкостей. Новосибирск: СО Наука, 1983. 316 с.

4. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М: Наука, 1971. 552 с.

*Игорь Николаевич ЕФИМОВ —
преподаватель кафедры математики,
информатики и естественных наук
Тюменского государственного института
мировой экономики, управления и права*

УДК 530.145

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

АННОТАЦИЯ. Обсуждается возможность отличной от статистической интерпретации волновой функции.

The possibility of the different wave function statistic interpretation is discussed.

Как известно, состояния квантово-механических систем описываются волновой функцией. Волновая функция не имеет прямого физического смысла. Самой распространенной является статистическая интерпретация волновой функции. В статистической интерпретации квадрат волновой функции определяет вероятность нахождения частицы в данном состоянии. Никто пока не доказал, что такой подход является правильным или единственно возможным. То, что такой подход позволяет получить достаточно точные результаты, еще ничего не доказывает. Как известно, никакой эксперимент не может подтвердить теорию, он может ее только опровергнуть.

Введение волновой функции для описания квантово-механических систем явилось следствием того, что еще во времена создания квантовой механики не удалось найти уравнения, которые могли бы использовать только электронную плотность, которая в отличие от волновой функции имеет прямой и ясный физический смысл, и давали бы правильные результаты. Но то, что такие уравнения не были найдены, не является доказательством того, что они не существуют. Например, в последние четыре десятилетия во всем мире активно развивается и применяется метод функционала электронной плотности.

Автором был предложен метод, отличный от метода функционала плотности. Новый метод позволил записать основное уравнение только с использованием электронных плотностей. Это уравнение дает правильные результаты и позволяет многократно уменьшить трудоемкость расчетов состояний атомов, молекул и твердых тел.

Как правило, решение известных задач известными методами встречает всеобщее одобрение, а все новые идеи немедленно отбрасываются. Но еще никто из великих ученых не доказал, что существующие методы являются единственно возможными. Многие специалисты без доказательства верят в старые подходы и собственную непогрешимость. До сих пор не получен вывод даже уравнения Шредингера, что говорит о том, что некоторые результаты угаданы, но еще не достигнута достаточная глубина понимания некоторых физических явлений.

По нашему мнению, если какой-то новый подход позволяет получить приемлемые результаты, он заслуживает самого пристального внимания. Разносто-