

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Математический факультет

Кафедра алгебры и математических методов гидродинамики

Изучение единственности слабых решений уравнений Навье-Стокса

Бакалаврская работа

Направление 01.03.01 Математика

Профиль Математическое моделирование

Зав. кафедрой	_____	д.ф.-м.н., проф.	В. Г. Звягин 22.06.2020
---------------	-------	---------------------	-------------------------

Обучающийся			Д. А. Мукасеева
-------------	---	--	-----------------

Руководитель	_____	к.ф.-м.н., доц.	А. В. Звягин
--------------	-------	-----------------	--------------

Воронеж 2020

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Математический факультет

Кафедра алгебры и математических методов гидродинамики

Изучение единственности слабых решений уравнений Навье-Стокса

Бакалаврская работа

Направление 01.03.01 Математика

Профиль Математическое моделирование

Зав. кафедрой	_____	д.ф.-м.н., проф.	В. Г. Звягин 08.06.2020
---------------	-------	---------------------	-------------------------

Обучающийся	_____		Д. А. Мукасева
-------------	-------	--	----------------

Руководитель	_____	к.ф.-м.н., доц.	А. В. Звягин
--------------	-------	-----------------	--------------

Воронеж 2020

Содержание

Введение	4
1 Понятие слабого решения	5
2 Единственность слабого решения	15
Список литературы	19

Введение

В данной бакалаврской работе изучается система уравнений Навье-Стокса. Данная система уравнений датируется 1822 г., когда Навье¹ впервые записал уравнение в частных производных для потока вязкой жидкости. Стокс² внес свой вклад в 1842 и 1843 г. Эйлер записал уравнения в частных производных для жидкости с нулевой вязкостью — совершенно невязкой в 1757 г. Это уравнение тоже полезно, но большинство реальных жидкостей, включая воду и воздух, является вязкими, поэтому Навье и Стокс моделировали уравнение Эйлера таким образом, чтобы учесть это свойство. Они вывели примерно одинаковые уравнения независимо друг от друга, поэтому оно называется в честь них обоих. Навье сделал в процессе вывода несколько математических ошибок, но получил верный ответ, а у Стокса с математикой все было в порядке, и именно поэтому мы знаем, что ответ Навье верен, несмотря на ошибку.

Несмотря на довольно долгие математические исследования данной системы уравнений (начиная с 1822 г.), вопрос существования и гладкости решений для системы Навье-Стокса остался открытым до сих пор. В анализе решений данной системы заключается суть одной из семи "проблем тысячелетия за решение которых Математический институт Клэя назначил огромную премию. Одним из главных и глобальных толчков при изучении данной системы было доказательство Жаном Лере в 1934 г. существования и в ряде случаев единственности слабых решений для данной системы. Данная бакалаврская работа посвящена как раз рассмотрению и изучению понятия слабого решения для системы уравнений Навье-Стокса, а также изучению единственности слабых решений в двумерном случае.

¹ Клод-Луи Навье — французский инженер и физик

² Джордж Стокс — ирландский математик и физик

1 Понятие слабого решения

Пусть Ω — ограниченная область в пространстве R^n , где $n = 2, 3$, с достаточно гладкой границей $\partial\Omega$. Рассмотрим начально-краевую задачу для системы уравнений Навье-Стокса

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \sum_{i=1}^n v_i \frac{\partial v}{\partial x_i} - \nu \Delta v + \nabla p = f; \quad (1)$$

$$\operatorname{div} v = 0; \quad (2)$$

$$v|_{t=0} = v_0; \quad (3)$$

$$v|_{(0,T) \times \partial\Omega} = 0. \quad (4)$$

Здесь $v = (v_1(t, x), \dots, v_n(t, x))$ — вектор-функция скорости движения частицы жидкости, $p = p(t, x)$ — функция давления, $f = f(t, x)$ — вектор-функция плотности внешних сил, $\nu > 0$ — коэффициент вязкости. $\Delta v = (\Delta v_1, \dots, \Delta v_n)$, $\Delta v_i = \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_1^2} + \dots + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_n^2}$; $\operatorname{div} v = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \dots + \frac{\partial v_n}{\partial x_n}$; $\nabla p = (\frac{\partial p}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial p}{\partial x_n})$.

Сформулируем определение сильного решения рассматриваемой задачи (1)-(4). Для этого введем необходимые функциональные пространства:

$L_p(\Omega)$ — множество измеримых функций, суммируемых с p -ой степенью, где $1 \leq p < \infty$, и нормой $\|v\|_{L_p(\Omega)} = (\int_{\Omega} |v(x)|^p dx)^{1/p}$.

Пространство $L_{\infty}(\Omega)$ состоит из измеримых существенно ограниченных функций $v : \Omega \rightarrow R^n$. Функция $v : \Omega \rightarrow R^n$ называется существенно ограниченной, если существует число $C_1 < \infty$, что $|v(x)| \leq C_1$ при почти всех $x \in \Omega$. Норма в $L_{\infty}(\Omega)$ задается $\|v\|_{L_{\infty}(\Omega)} = \operatorname{ess\,sup}_{x \in \Omega} |v(x)|$.

$W_p^m(\Omega)$ — где $m \geq 1$, $p \geq 1$, пространство Соболева, состоящее из функции, которые со своими обобщенными частными производными до порядка m включительно принадлежат пространству $L_p(\Omega)$. Норма в $W_p^m(\Omega)$

$$\|v\|_{W_p^m(\Omega)} = \left(\sum_{|\alpha| \leq m} \int_{\Omega} |D^{\alpha} v(x)|^p dx \right)^{1/p}.$$

$C_0^\infty(\Omega)$ — пространство бесконечно дифференцируемых функций на Ω со значениями в R^n и с компактным носителем, содержащимся в Ω .

\mathcal{V} — множество функций $v \in C_0^\infty(\Omega)$, таких что $\operatorname{div} v = 0$;

H — замыкание \mathcal{V} по норме пространства $L_2(\Omega)$;

V — замыкание \mathcal{V} по норме пространства $W_1^1(\Omega)$;

$L_p(a, b; X)$ — где $1 \leq p < \infty$ пространство суммируемых с p -ой степенью функций на $[a, b]$ со значениями в банаховом пространстве X . Норма пространства $L_p(a, b; X)$ задается $\|v\|_{L_p(a, b; X)} = \left(\int_0^T \|v(s)\|_X^p ds \right)^{1/p}$.

Через $L_\infty(a, b; X)$ будем обозначать множество всех измеримых существенно ограниченных функций $v : [a, b] \rightarrow X$. Множество $L_\infty(a, b; X)$ является банаховым пространством относительно нормы $\|v\|_{L_\infty(a, b; X)} = \operatorname{ess\,sup}_{x \in \Omega} \|v(s)\|_X$.

Будем обозначать E^* сопряженное пространство к пространству E .

$\langle f, \varphi \rangle$ — обозначим действие функционала f из E^* на элемент φ из E .

C_i — будем обозначать положительные константы.

Пусть f и v_0 — заданные функции, где $f \in L_2(0, T; L_2(\Omega))$ и $v_0 \in V$.

Определение 1.1. *Сильным решением начально-краевой задачи (1)-(4) называется пара функций $v \in L_2(0, T; L_2(\Omega))$ и $p \in L_2(0, T; L_2(\Omega))$, удовлетворяющих следующим условиям:*

1. обобщенные частные производные функций, содержащихся в равенствах (1)-(2), принадлежат пространству $L_2(0, T; L_2(\Omega))$;
2. при подстановке функций уравнения (1)-(2) обращаются в равенства в пространстве $L_2(0, T; L_2(\Omega))$;
3. функция v удовлетворяет начальному условию (3) и граничному условию (4).

Введем понятие слабого решения. Для этого пусть v и p — сильное решение задач (1)-(4).

Чтобы обеспечить понимание определения слабого решения, мы временно предположим, что $v = v(t, x)$ и $p = p(t, x)$ являются, фактически, гладкими решениями задачи. Сопоставим функции v отображение

$v : [0, T] \rightarrow W_2^1(\Omega)$, определенное по формуле

$$[v(t)](x) = v(t, x), t \in [0, T], x \in \Omega.$$

Другими словами, v рассматривается не как функции переменных t и x , а как функция переменной t , определенная на отрезке $[0, T]$ и принимающая значения в функциональном пространстве $W_2^1(\Omega)$.

Аналогично определим $p : [0, T] \rightarrow L_2(\Omega)$ по формуле

$$[p(t)](x) = p(t, x), t \in [0, T], x \in \Omega$$

и функцию $f : [0, T] \rightarrow L_2(\Omega)$ по формуле

$$[f(t)](x) = f(t, x), t \in [0, T], x \in \Omega.$$

Умножая равенство (1) при фиксированных значениях $t \in [0, T]$ на функцию $\varphi(x) \in V$ скалярно в $L_2(\Omega)$, получим

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \frac{\partial v}{\partial t} \varphi dx + \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i \frac{\partial v}{\partial x_i} \varphi dx - \\ & - \nu \sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i^2} \varphi_j dx + \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \frac{\partial p}{\partial x_i} \varphi_i dx = \int_{\Omega} f \varphi dx. \end{aligned}$$

Выполним преобразования слагаемых, связанные с интегрированием по частям ³

$$-\nu \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i^2} \varphi_j dx = \nu \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} = \nu \int_{\Omega} \nabla v : \nabla \varphi dx.$$

³ Теорема Грина (теорема об интегрировании по частям функций нескольких переменных)

Пусть Ω — область с липшицевой границей и пусть $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$ и $g(x) = g(x_1, \dots, x_n) \in W_2^1(\Omega)$.

Тогда выполнено соотношение:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial f}{\partial x_i} g dx = \int_{\partial \Omega} f g v_i ds - \int_{\Omega} f \frac{\partial g}{\partial x_i} dx,$$

где v_i — i -ая координата единичного вектора внешней нормали.

Здесь символ «:» обозначает покомпонентное матричное произведение, т. е. для $C = (c_{ij}), D = (d_{ij}), i, j = 1, \dots, m$, имеем $C : D = \sum_{i,j=1}^m c_{ij}d_{ij}$.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \frac{\partial p}{\partial x_i} \varphi_i dx &= - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} p \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} dx = \int_{\Omega} p \operatorname{div} \varphi dx = 0; \\ \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i \frac{\partial v}{\partial x_i} \varphi dx &= - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i \varphi) dx = \\ &= - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \varphi dx - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v v_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx = \\ &= - \int_{\Omega} v \varphi \operatorname{div} v dx - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i v \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx = - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i v \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx. \end{aligned}$$

Таким образом, приходим к равенству

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} v \varphi dx - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i v \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx + v \int_{\Omega} \nabla v : \nabla \varphi dx = \int_{\Omega} f \varphi dx. \quad (5)$$

Заметим, что равенство (5) может выполняться и при более слабых требованиях на функцию $v(t, x)$. Покажем, что достаточно предполагать, что $v \in L_2(0, T; V)$ для того, чтобы каждый интеграл, входящий в равенство (5), имел смысл.

В силу теоремы вложений Соболева⁴ вложение $W_2^1(\Omega) \subset L_4(\Omega)$ непрерывно при $n \leq 4$. Поэтому, так как $V \subset W_2^1(\Omega)$, то $v_i(t, x)v(t, x) \in L_2(\Omega)$ и $v_i(t, x)v(t, x)\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \in L_1(\Omega)$ при каждом фиксированном значении t . Следовательно, интеграл $\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i v \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx$ определен.

Кроме того, это слагаемое определяет линейный непрерывный функционал на V . Обозначим этот функционал через $K(v)$:

$$\langle K(v), \varphi \rangle = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i v \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx.$$

⁴ Пусть $p_1 \geq p$ и $\mathfrak{a}(W_{p_1}^{m_1}(\Omega)) > \mathfrak{a}(W_p^m(\Omega))$, то пространство $W_p^m(\Omega)$ компактно вложено в пространство $W_{p_1}^{m_1}(\Omega)$, где $\mathfrak{a}(W_p^m(\Omega)) = \frac{n}{p} - m$.

Отметим, что $\int_{\Omega} v\varphi dx \in L_2(0, T)$ и производная в выражении $\frac{d}{dt} \int_{\Omega} v\varphi dx$ понимается в смысле распределений на интервале $(0, T)$. Поэтому равенство (5) выполняется в смысле распределений. Все слагаемые равенства, исключая первое, принадлежат пространству $L_1(0, T)$, поэтому $\frac{d}{dt} \int_{\Omega} v\varphi dx \in L_1(0, T)$ и равенство (5) выполняется для почти всех значений $t \in (0, T)$.

Подводя итог рассуждениям, приходим к следующему определению слабого решения.

Определение 1.2. Пусть $f \in L_2(0, T; L_2(\Omega))$ и $v_0 \in H$. Слабым решением задачи (1)-(4) называется функция $v \in L_2(0, T; V)$, удовлетворяющая для всех $\varphi \in V$ и для почти всех значений $t \in (0, T)$ равенству

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} v\varphi dx - \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} v_i v \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx + \nu \int_{\Omega} \nabla v : \nabla \varphi dx = \int_{\Omega} f\varphi dx \quad (6)$$

с условием

$$v(0) = v_0. \quad (7)$$

Выше показано, что равенство (6) корректно для $v \in L_2(0, T; V)$ и если (v, p) сильное решение задачи (1)-(4), то v является слабым решением. Поэтому задачу о поиске сильных решений заменим задачей об исследовании слабых решений.

Заметим, однако, что для функции $v \in L_2(0, T; V)$ условие (7) не имеет смысла, так как не определено значение функции $v(t)$ в каждой точке $t \in (0, T)$. Покажем, что функция $v(t)$, удовлетворяющая равенству (6), является непрерывной на $[0, T]$ со значениями в V^* и слабо непрерывной со значениями в H . Поэтому равенство (7) имеет смысл и определение слабого решения корректно.

Преобразуем равенство (6). Скалярное произведение $(v(t), \varphi)_{L_2(\Omega)}$ определяет линейный непрерывный функционал на H , а следовательно, элемент из H^* . Учитывая отождествление $H \equiv H^*$ и цепочку вложений $V \subset H \subset H^* \subset V^*$, элемент $v(t)$ можно рассматривать как функционал на V , действие которого на функцию $\varphi \in V$ определяется равенством $\langle v(t), \varphi \rangle = (v(t), \varphi)_{L_2(\Omega)}$. Тогда можно считать, что функция $v(t)$ на $[0, T]$

принимает значения в V^* и

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} v \varphi dx = \frac{d}{dt} \langle v(t), \varphi \rangle.$$

С учетом введенных обозначений равенство (6) можно записать в виде

$$\frac{d}{dt} \langle v(t), \varphi \rangle - \nu \langle \Delta v(t), \varphi \rangle - \langle K(v(t)), \varphi \rangle = \langle f(t), \varphi \rangle,$$

где $\Delta : V \rightarrow V^*$, обозначает оператор Лапласа, действующий по правилу $\langle \Delta v(t), \varphi \rangle = - \int_{\Omega} \nabla v : \nabla \varphi dx$. Или можно (6) переписать в виде:

$$\frac{d}{dt} \langle v(t), \varphi \rangle = \langle \nu \Delta v(t) + K(v(t)) + f(t), \varphi \rangle. \quad (8)$$

Исследуем свойства операторов, входящих в правую часть равенства.

Лемма 1.1.

1. Оператор $\Delta : L_2(0, T; V) \rightarrow L_2(0, T; V^*)$ линейный и непрерывный, причем

$$\|\Delta v\|_{L_2(0, T; V^*)} = \|v\|_{L_2(0, T; V)}, \quad \forall v \in L_2(0, T; V). \quad (9)$$

2. Оператор $K : L_2(0, T; V) \rightarrow L_1(0, T; V^*)$ непрерывен и справедлива оценка

$$\|K(v)\|_{L_1(0, T; V^*)} \leq C_2 \|v\|_{L_2(0, T; V)}^2, \quad \forall v \in L_2(0, T; V), \quad (10)$$

для некоторой константы C_2 .

Доказательство.

1. Покажем, что оператор $\Delta : V \rightarrow V^*$ линейный. Для этого возьмем v и u , принадлежащая пространству V и применим к ним оператор

Лапласа

$$\begin{aligned}\Delta(\alpha v + \beta u) &= \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} (\alpha v_i + \beta u_i) = \\ &= \alpha \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} + \beta \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} = \alpha \Delta v + \beta \Delta u.\end{aligned}$$

Заметим, что оператор $\Delta : V \rightarrow V^*$ определяет геометрию пространств. Действительно:

$$\begin{aligned}\|\Delta v\|_{V^*} &= \sup_{\varphi \in V} \frac{|\langle \Delta v, \varphi \rangle|}{\|\varphi\|_V} = \sup_{\varphi \in V} \frac{\left| \int_{\Omega} \nabla v : \nabla \varphi dx \right|}{\|\varphi\|_V} \leq \\ &\leq \sup_{\varphi \in V} \frac{\|\nabla v\|_{L_2(\Omega)} \|\nabla \varphi\|_{L_2(\Omega)}}{\|\varphi\|_V} \leq \sup_{\varphi \in V} \frac{\|v\|_V \|\varphi\|_V}{\|\varphi\|_V} = \|v\|_V.\end{aligned}$$

То есть $\|\Delta v\|_{V^*} \leq \|v\|_V$. С другой стороны, положим $\varphi = v$:

$$|\langle \Delta v, v \rangle| = \left| \int_{\Omega} \nabla v : \nabla v dx \right| = \|v\|_V^2.$$

Применим неравенство Коши-Буняковского

$$\|v\|_V^2 = |\langle \Delta v, v \rangle| \leq \|\Delta v\|_{V^*} \|v\|_V.$$

Сократив на $\|v\|_V$, получим $\|\Delta v\|_{V^*} \geq \|v\|_V$. Следовательно получаем $\|\Delta v\|_{V^*} = \|v\|_V$. Заметим, что линейный ограниченный оператор является непрерывным.

Отсюда для $v \in L_2(0, T; V)$ имеем $\|\Delta v\|_{V^*} = \|v(t)\|_V$ для почти всех $t \in [0, T]$. Так как $\|v(t)\|_V \in L_2(0, T)$, то $\|\Delta v(t)\|_{V^*} \in L_2(0, T)$. Следовательно, $\Delta v \in L_2(0, T; V^*)$ и справедливо равенство (9). Таким образом, линейный оператор Δ определяет изометрию пространств $L_2(0, T; V)$ и $L_2(0, T; V^*)$.

2. По определению оператора K для любых $v, \varphi \in V$ действует по правилу

$$\langle K(v), \varphi \rangle = \sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} v_i v_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} dx.$$

Значит для любого $v \in V$ получим

$$\begin{aligned} \left| \langle K(v), \varphi \rangle \right| &\leq \left| \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n v_i v_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} dx \right| \leq \\ &\leq \left(\sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} \left| v_i v_j \right|^2 dx \right)^{1/2} \left(\sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} \left| \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} \right|^2 dx \right)^{1/2} \leq \\ &\leq \left(\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \left| v_i \right|^4 dx \right)^{1/4} \left(\sum_{j=1}^n \int_{\Omega} \left| v_j \right|^4 dx \right)^{1/4} \left(\sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} \left| \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} \right|^2 dx \right)^{1/2} \leq \\ &\leq \|v\|_{L_4(\Omega)}^2 \|\varphi\|_V. \end{aligned}$$

По теореме вложения Соболева вложение $V \in L_4(\Omega)^n$ непрерывно для $n \leq 4$, поэтому, $\|v\|_{L_4(\Omega)^n} \leq C_3 \|v\|_V$ и, следовательно, $\|K(v)\|_{V^*} \leq C_3^2 \|v\|_V^2$. Отсюда для $v \in L_2(0, T; V)$ имеем $K(v) \in L_1(0, T; V^*)$ и

$$\begin{aligned} \|K(v)_{L_1(0,T;V^*)}\| &\leq \int_0^T \|K(v(t))\|_{V^*} dt \leq \\ &\leq C_3^2 \int_0^T \|v(t)\|_V^2 dt = C_3^2 \|v\|_{L_2(0,T;V)}^2. \end{aligned}$$

Докажем непрерывность оператора K . Для любых функций $v, u \in L_2(0, T; V)$ справедлива оценка

$$\begin{aligned} \int_0^T \|K(v) - K(u)\|_{V^*} dt &\leq \int_0^T \left(\sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} (v_i v_j - u_i u_j)^2 dx \right)^{1/2} dt \leq \\ &\leq \int_0^T \left(\sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} (v_i(v_j - u_j) + (v_i - u_i)u_j)^2 dx \right)^{1/2} dt \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq \sqrt{2} \sum_{i,j=1}^n \int_0^T \left(\int_{\Omega} v_i^2 (v_j - u_j)^2 dx \right)^{1/2} + \left(\int_{\Omega} (v_i - u_i)^2 u_j dx \right)^{1/2} \leq \\
&\leq \sqrt{2} \sum_{i,j=1}^n \int_0^T (\|v_i\|_{L_4(\Omega)} \|v_j - u_j\|_{L_4(\Omega)} + \|v_i - u_i\|_{L_4(\Omega)} \|u_j\|_{L_4(\Omega)}) dt \leq \\
&\leq C_2 (\|v\|_{L_2(0,T;L_4(\Omega))} + \|u\|_{L_2(0,T;L_4(\Omega))}) \|v - u\|_{L_2(0,T;L_4(\Omega))}.
\end{aligned}$$

Отсюда, если $\|v - u\|_{L_2(0,T;L_4(\Omega))} \rightarrow 0$, то $\|K(v) - K(u)\|_{L_1(0,T;V)} \rightarrow 0$. Поэтому отображение K непрерывно.

□

По утверждению леммы $\nu \Delta v \in L_2(0, T; V^*)$, $K(v) \in L_1(0, T; V^*)$, поэтому $\nu \Delta v(t) + K(v(t)) + f(t) \in L_1(0, T; V^*)$. Тогда из равенства (8) и теоремы⁵ следует:

1. что функция $v(t)$ имеет суммируемую производную $v'(t)$;
2. в силу равенства $\frac{d}{dt} \langle \phi, u(t) \rangle = \langle \phi, g(t) \rangle$;

$$\frac{d}{dt} \langle v(t), \varphi \rangle = \langle v'(t), \varphi \rangle;$$

3. равенство $\frac{d}{dt} \langle v(t), \varphi \rangle = \langle \Delta v(t) + K(v(t)) + f(t), \varphi \rangle$ можно записать в виде

$$v'(t) = \nu \Delta v(t) + K(v(t)) + f(t).$$

⁵ Теорема Пусть X — банахово пространство с сопряженным X^* и функции u, g принадлежат пространству $L_1(a, b, X)$. Тогда следующие три условия эквивалентны:

(а) функция $u(t)$ почти всюду равна первообразной от $g(t)$ и для п.в. $t \in [a, b]$

$$u(t) = \xi + \int_a^b g(s) ds, \xi \in X;$$

(б) для каждой пробной функции $\eta \in \mathcal{D}(a, b)$

$$\int_a^b u(t) \eta'(t) dt = - \int_a^b g(t) \eta(t) dt;$$

(с) для каждого $\phi \in X^*$

$$\frac{d}{dt} \langle \phi, u(t) \rangle = \langle \phi, g(t) \rangle$$

в смысле скалярных распределений на (a, b) . Если условия (а)-(с) выполнены, то u , в частности, почти всюду равна некоторой непрерывной функции.

Подводя итог рассуждений, отметим, что так как $v'(t) \in L_1(0, T; V^*)$, в силу леммы 1.2

Лемма 1.2. *Для $p_0 \geq 1$, $p_1 \geq 1$ имеет место вложение $W_{p_0, p_1} = \{v \in L_{p_0}(a, b, X_0), v_1 \in L_{p_0}(a, b, X_0)\} \subset C([a, b], X_1)$ и это вложение непрерывно.*

поэтому функция $v(t)$ непрерывна на отрезке $[0, T]$ со значениями в V^* . Кроме того, в виду леммы 1.3,

Лемма 1.3. *Пусть X и Y — банаховы пространства, такие, что X — рефлексивно и вложение $X \subset Y$ непрерывно. Если функция $v \in L_\infty(a, b; X)$ слабо непрерывна как функция со значениями в Y , то и слабо непрерывна и как функция со значениями в X .*

если функция $v \in L_\infty(0, T; H)$, то эта функция слабо непрерывна со значениями в H . Поэтому начальное условие (7) имеет смысл.

Переформулируем понятие слабого решения

Определение 1.3. *Пусть $n \leq 4$, $f \in L_2(0, T; L_2(\Omega))$ и $v \in H$. Слабым решением задачи (1)-(4) называется функция $v \in L_2(0, T; V) \cap L_\infty(0, T; H)$ и условию $v' \in L_1(0, T; V^*)$, удовлетворяющая при почти всех значений $t \in (0, T)$ равенству*

$$v'(t) - \nu \Delta v(t) - K(v(t)) = f(t) \quad (11)$$

и начальному условию

$$v(0) = v_0. \quad (12)$$

Для системы уравнений Навье-Стокса (1)-(4) Ж. Лере в 1934 г. был получен следующий результат:

Теорема 1.1. *Пусть $n = 2, 3$. Для каждой функции $f \in L_2(0, T; V^*)$ и $v_0 \in H$ начально-краевая задача (1)-(4) имеет хотя бы одно слабое решение v .*

2 Единственность слабого решения

В этом разделе мы рассмотрим вопрос о единственности слабого решения начально-краевой задачи (1)-(4) для эволюционной системы уравнений Навье-Стокса. Покажем, что в случае $\Omega \subset R^2$ слабое решение начально-краевой задачи единственно. Однако для размерности $n > 2$ аналогичное утверждение неверно. Примером, показывающим, что слабое решение задачи не единственно, служит результат о бифуркации решений, содержащийся, например, в [1, гл.II, §4, п.4.4].

Сформулируем и докажем утверждение о единственности слабого решения в случае $n = 2$.

Теорема 2.1. *Пусть Ω ограниченная область в R^2 с достаточно гладкой границей $\partial\Omega$. Тогда слабое решение v задачи (1)-(4) единственно.*

Доказательство. Покажем единственность слабого решения. Предположим, что u и v – слабые решения начально-краевой задачи (1)-(4). Значит, для этих функций выполнено операторное равенство (11). Рассмотрим разность полученных равенств. Для разности $w = v - u$ получим равенство

$$w' - \nu \Delta w(t) - K(v(t)) + K(u(t)) = 0$$

Применим функционалы, стоящие в равенстве, к функции $w(t)$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} w(t, x) w(t, x) dx + \nu \int_{\Omega} \nabla w(t, x) : \nabla w(t, x) dx = \\ & = \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} v_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx - \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} u_i(t, x) u(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx. \end{aligned} \quad (13)$$

Оценим правую часть полученного равенства.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} v_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx - \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} u_i(t, x) u(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx = \\ & = \sum_{i=1}^2 \left[\int_{\Omega} v_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx - \int_{\Omega} u_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{\Omega} u_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx - \int_{\Omega} u_i(t, x) u(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx \Big] = \\
& = \sum_{i=1}^2 \left[\int_{\Omega} v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} (v_i(t, x) - u_i(t, x)) dx + \right. \\
& + \int_{\Omega} u_i(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} (v(t, x) - u(t, x)) dx \Big] = \sum_{i=1}^2 \left[\int_{\Omega} w_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} + \right. \\
& \left. + \int_{\Omega} w(t, x) u_i(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} \right] dx.
\end{aligned}$$

Используем интегрирование по частям для вычисления первого интеграла

$$\sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} w_i(t, x) v(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx = - \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx,$$

так как $\sum_{i=1}^2 \frac{\partial w_i(t, x)}{\partial x_i} = \operatorname{div} w(t, x) = 0$. Используем интегрирование по частям для вычисления второго из интегралов

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} u_i(t, x) w(t, x) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x_i} dx & = \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} u_i(t, x) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial |w(t, x)|^2}{\partial x_i} dx = \\
& = -\frac{1}{2} \int_{\Omega} \sum_{i=1}^{n=2} \frac{\partial u_i(t, x)}{\partial x_i} \cdot |w(t, x)|^2 dx = 0,
\end{aligned}$$

так как $\sum_{i=1}^2 \frac{\partial u_i(t, x)}{\partial x_i} = \operatorname{div} u(t, x) = 0$. Отсюда и из равенства (13) получим

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} w(t, x) w(t, x) dx + \nu \int_{\Omega} \nabla w(t, x) : \nabla w(t, x) dx = \\
& = - \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx
\end{aligned}$$

ИЛИ

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|w(t)\|_H^2 + \nu \|w(t)\|_V^2 \leq \left| \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx \right|. \quad (14)$$

Оценим правую часть неравенства, используя неравенства Шварца:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx \right| &= \left| \sum_{i,j=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v_j(t, x)}{\partial x_i} w_j(t, x) dx \right| \leq \\ &\leq \left(\sum_{i,j=1}^{n=2} \int_{\Omega} |w_i(t, x)|^2 |w_j(t, x)|^2 dx \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{i,j=1}^{n=2} \int_{\Omega} \left| \frac{\partial v_j(t, x)}{\partial x_i} \right|^2 dx \right)^{1/2} \leq \\ &\quad \left(\sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} |w_i(t, x)|^4 dx \right)^{1/4} \left(\sum_{j=1}^{n=2} \int_{\Omega} |w_j(t, x)|^4 dx \right)^{1/4} \cdot \\ &\quad \cdot \left(\sum_{i,j=1}^{n=2} \int_{\Omega} \left| \frac{\partial v_j(t, x)}{\partial x_i} \right|^2 dx \right)^{1/2} \end{aligned}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} \left| \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx \right| &\leq \\ &\leq \sum_{i=1}^{n=2} \|w_i(t)\|_{L_4(\Omega)} \|w_j(t)\|_{L_4(\Omega)} \left\| \frac{\partial v_j(t)}{\partial x_i} \right\|_{L_2(\Omega)}. \end{aligned}$$

Учитывая, суммирование по повторяющимся индексам, получаем

$$\left| \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx \right| \leq \|w(t)\|_{L_4(\Omega)}^2 \|v(t)\|_V.$$

Применим неравенство О.А. Ладыженской и далее неравенство Коши

$a \cdot b = \varepsilon a^2 + \frac{b^2}{4\varepsilon} c$ $\varepsilon = \frac{\nu}{2^{1/2}}$, получим

$$\left| \sum_{i=1}^{n=2} \int_{\Omega} w_i(t, x) \frac{\partial v(t, x)}{\partial x_i} w(t, x) dx \right| \leq$$

$$\begin{aligned}
&\leq 2^{1/2} \|w(t)\|_{L_2(\Omega)} \|w(t)\|_V \|v(t)\|_V \leq \\
&\leq \nu \|w(t)\|_V^2 + \frac{1}{2^{3/2}\nu} \|w(t)\|_{L_2(\Omega)}^2 \|v(t)\|_V.
\end{aligned}$$

Подставляя полученное соотношение в неравенство (14), получаем

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|w(t)\|_H^2 \leq \frac{1}{2^{3/2}\nu} \|w(t)\|_H^2 \|v(t)\|_V.$$

Тогда из неравенства Гронуолла-Беллмана [1, теорема 2б, глава IV, с.188] следует

$$\|w(t)\|_H^2 \leq \|w(0)\|_H^2 \exp \left(\int_0^t \frac{1}{2^{1/2}\nu} \|v(s)\|_V ds \right).$$

Поскольку $w(0) = v(0) - u(0) = 0$, то из полученного выше неравенства приходим к выводу, что $w(t) = 0$ для всех $t \in [0, T]$. Следовательно, $v = u$ и слабое решение задачи (1)-(4) единственно. \square

Список литературы

1. Р. Темам. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ.
/ Р. Темам. — 1833 — Москва, 1987. — 409 с.
2. В. Г. Звягин, В. Т. Дмитриенко. Аппроксимационно-топологический переход к исследованию задач гидродинамики. Система Навье-Стокса.
/ В. Г. Звягин, В. Т. Дмитриенко // — Москва: Едиториал УРСС, 2004. — 112 с.
3. О. А. Ладыжская. Математические вопросы / О.А. Ладыжская. // — Москва: Наука, 1970. — 288 с.
4. Ж. Л. Лионс. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач.
/ Ж.-Л. Лионс. // — Москва: Мир, 1972 г., — 587 с.
5. Leray J. Essai sur le mouvement d'un fluide visqueux emplissant l'espace.
/ J. Leray // Acta Math, 1934, 193-248 p.