

О НЕСИММЕТРИЧНОМ СОУДАРЕНИИ ПЛОСКИХ СТРУЙ ИДЕАЛЬНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

С. А. Кинеловский, А. В. Соколов

(Новосибирск)

Задача о несимметричном соударении плоских струй идеальной несжимаемой жидкости уже в течение ряда десятилетий рассматривается как не имеющая однозначного решения (см., например, [1—3]). Причина неоднозначности — математическая неопределенность задачи, хотя из общих физических рассуждений можно ожидать, что при заданных ширине соударяющихся струй и угле соударения конфигурация течения должна определяться однозначно. Интерес к этой задаче обусловлен тем, что она широко используется для описания (в первом приближении) процесса высокоскоростного косоугольного соударения металлических пластин.

Картина течения при соударении плоских свободных струй, имеющих одинаковую плотность $\rho = 1$ и скорость $v = 1$ (в бесконечно удаленной точке и на свободных границах), представлена на рис. 1, где a_1 и a_3 — ширины соударяющихся струй (в бесконечно удаленной точке), θ_3 — угол соударения, a_2 и a_4 — ширины отходящих струй, θ_2 и θ_4 — углы их наклона к оси x (угол θ_4 для простоты уменьшен на π). Из условий сохранения потока массы и проекций потока импульса следуют три уравнения, которые с учетом принятых обозначений имеют вид

$$(1) \quad \begin{aligned} a_1 + a_3 &= a_2 + a_4, \quad a_1 + a_3 \cos \theta_3 = \\ &= a_2 \cos \theta_2 - a_4 \cos \theta_4, \quad a_3 \sin \theta_3 = a_2 \sin \theta_2 - a_4 \sin \theta_4. \end{aligned}$$

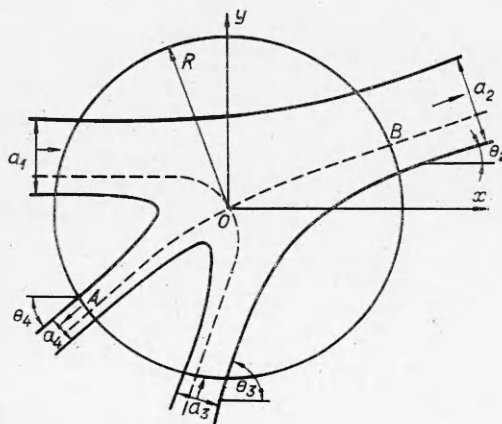
Таким образом, для определения четырех неизвестных величин (a_2 , a_4 , θ_2 и θ_4) имеются лишь три уравнения, из которых получается связь между значениями углов θ_2 и θ_4 (соответственно прямой и обратной отходящих струй):

$$(2) \quad \theta_2 = 2 \operatorname{arctg} [(\sin \theta_4 + m)/(\cos \theta_4 + n)] - \theta_4,$$

где $m = k \sin \theta_3 / (1 + k)$; $n = (1 + k \cos \theta_3) / (1 + k)$; $k = a_3 / a_1$; причем допустимые значения угла наклона обратной струи находятся в диапазоне $0 \leq \theta_4 \leq \theta_3$. Это остается справедливым и для случая соударения струй одинаковой ширины ($k = 1$), если на возникающую конфигурацию течения заранее не накладывать условие ее симметричности.

Итак, точное решение [1—3] задачи зависит от одного неопределенного параметра (например, θ_4), для выбора значения которого необходимо привлекать какие-то дополнительные соображения. Одна из известных попыток замкнуть задачу — гипотеза [4], откуда следует, что прямая и обратная отходящие струи в пределе движутся в противоположных направлениях ($\theta_2 = \theta_4$). Анализ исходной системы уравнений (1) показывает,

что такое значение углов отходящих струй соответствует точке перегиба кривой (2), а обратная струя при этом имеет минимальную из возможных ширину (потоки массы, импульса и энергии, уносимые обратной струей, минимальны). Предположение о противоположном направлении движения прямой и обратной отходящих струй при косоугольных соударениях сделано и в [5], но приведенные там в обоснование рассуждения трудно признать убедительными.



Р и с. 1

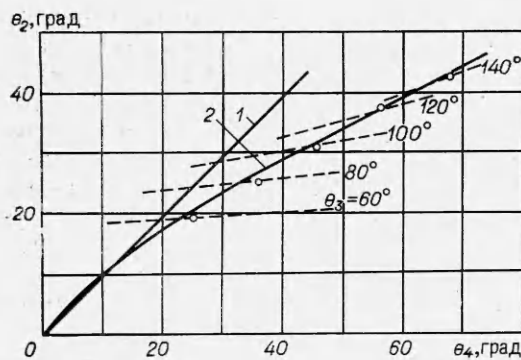
Неоднозначность решения задачи о несимметричном соударении плоских струй иногда трактуют как свидетельство равнозначности всех допустимых конфигураций и их неустойчивости [3]. Милн-Томсон считает, что конфигурация течения определяется начальной фазой соударения и разным начальным условиям соударения (например, задержкам во времени начала пуска одной из струй) «будут соответствовать различные установившиеся движения, хотя и нет оснований предполагать, что все они будут устойчивыми» [1].

Возможность оценки справедливости тех или иных гипотез и рассуждений всегда ограничивалась отсутствием надежных экспериментальных данных. В связи с этим проведено экспериментальное изучение несимметричного соударения плоских струй жидкости на моделирующей установке [6], показавшей на тестовых струйных задачах высокую степень достоверности получаемых результатов. Моделирование проводилось при нескольких значениях отношения k ширины соударяющихся струй и выборочно для нескольких значений скорости их соударения. В экспериментах использовались сопла с шириной выходящей струи 20 и 30 мм; несимметричное соударение реализовывалось из симметричного посредством отсекания части струи [6]. Величина скорости истекания варьировалась примерно от 2 до 4 м/с.

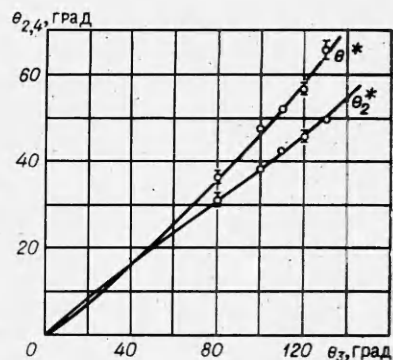
Моделирование несимметричного соударения показало, что для фиксированных значений величин k и θ_3 вне зависимости от начальных условий (задержка пуска одной из струй), от ширины и скорости струи достаточно стабильно возникает всего одна конкретная установившаяся конфигурация течения. Проводилось несколько независимых измерений углов отходящих струй как на разных стадиях опыта, так и в различных опытах. Отклонение измеренных величин от их средних значений для угла θ_2 не превышает $1-1,5^\circ$, а для θ_4 — $3-4^\circ$. Если посредством введения какой-то помехи изменить направления движения отходящих струй, то после удаления помехи восстанавливается та же самая конфигурация, что говорит об устойчивости движения.

Таким образом, проведенные эксперименты не подтверждают качественных рассуждений [1, 3] о характере реализующегося струйного течения. Тем не менее в данной задаче можно говорить о некоторой тенденции к неустойчивости течения для обратной отходящей струи, на что указывает больший разброс экспериментальных результатов для θ_4 . Из формулы (2) следует, что эта тенденция должна проявляться при уменьшении углов соударения струй. Расчет по (2) дает, что, например, при $k = 0,5$ изменение угла θ_2 на 1° для углов соударения $\theta_3 = 120-100^\circ$ вызывает изменение θ_4 на $3-5^\circ$, для $\theta_3 = 80-70^\circ$ — на $9-11^\circ$, для $\theta_3 = 60-50^\circ$ — на $16-22^\circ$. Поэтому понятно, что любые искажения и неоднородности, которые всегда есть в опыте, будут тем заметнее сказываться на обратной струе, чем меньше угол соударения. Этим частично объясняется тот факт, что в экспериментах граница обратной струи оказывается более «расплывчатой», чем у остальных струй, что наиболее ярко проявляется для углов соударения $\theta_3 \leq 100^\circ$ и делает практически невозможным моделирование с $\theta_3 < 60^\circ$ [6]. Похожий результат известен и для кумулятивных струй, для процесса образования которых рассматриваемая задача — приближенная модель. Эксперименты показывают, что неустойчивость кумулятивных струй, приводящая к их искривлению или даже распаду в поперечном направлении на отдельные частицы, увеличивается при уменьшении углов соударения пластин или углов схлопывания осесимметричных облицовок.

На рис. 2 ($k = 1/2$) приведены некоторые результаты для углов отходящих струй. Для каждого угла θ_3 соударения струй на плоскости (θ_4 , θ_2) по (2) можно построить кривую возможных углов наклона отходящих струй. Отдельные участки этих кривых для нескольких значений θ_3 показаны штриховыми линиями. Пересечение прямой I равных углов с этими кривыми по гипотезе [4] дает значения углов отходящих струй для соответствующего каждой кривой угла соударения. На рис. 2 видно, что



Р и с. 2



Р и с. 3

экспериментальные значения углов θ_2 и θ_4 , изображенные точками, с хорошей точностью ложатся на соответствующие кривые (2) и сильно отклоняются от прямой 1. Последнее означает, что гипотеза Палатини в общем случае неверна. Аналогичные рис. 2 результаты получены и для других значений k .

На рис. 3 представлены экспериментальные данные для углов θ_4 (верхние точки) и θ_2 (нижние) наклона отходящих струй в зависимости от угла соударения струй для случая $k = 0,667$. Здесь также наблюдается неравенство углов наклона прямой и обратной отходящих струй, хотя разница между ними уже заметно меньше, чем на рис. 2, поскольку этот режим соударения ближе к симметричному. Экстраполяция экспериментальных результатов (рис. 2 и 3) к меньшим углам соударения позволяет предположить, что для $\theta_3 \leq 50^\circ$ направление движения отходящих струй близко к противоположному.

Экспериментальное моделирование струйных соударений выявило еще один интересный результат. Пусть при соударении струй реализуется некоторая конфигурация течения (см. рис. 1). Зафиксируем направления движения отходящих струй и обратим в них вектор скорости, т. е. сделаем их соударяющимися; две остальные струи при этом становятся отходящими. Возникает вопрос, сохранится ли тогда конфигурация течения? Оказалось, что в общем случае она не сохраняется, т. е. струи, ставшие отходящими, «выбирают себе» другие направления движения, что иллюстрируется на примере несимметричного соударения противоположно направленных струй разной ширины (как известно [2, 3], эта задача имеет единственное решение и рассматривалась в [6] в качестве тестовой). Из расчетов и экспериментов следует, что разветвляющаяся линия тока в соударяющихся струях имеет точку перегиба (рис. 4). Прямые эксперименты для обращенного течения показали, что движение отходящих струй весьма существенно отличается от противоположного. Помимо количественного отличия в величинах углов наклона отходящих струй, имеется и еще одно принципиальное отличие. Из проведенных экспериментов видно, что для косых соударений в общем случае невозможно получить конфигурацию течения, для которой разветвляющаяся линия тока в отходящих струях имела бы точку перегиба, что должно было бы иметь место в указанной задаче при сохранении конфигурации.

Для частных случаев соударений струй с плоской или центральной симметриями конфигурация течения при его обращении сохраняется, что также подтверждено экспериментально (см., например, рис. 5 в [6]).

Поскольку по-прежнему остается неясным, какие дополнительные соображения следует привлекать для замыкания задачи о несимметричном соударении струй, сделаем попытку эмпирически количественно описать полученные в данной работе экспериментальные результаты. Рассмотрим снова картину течения, изображенную на рис. 1, и проведем из начала координат, связанного с точкой полного торможения потока, ок-

ружность радиуса R . Для фиксированного угла θ_3 соударения струй и данного радиуса R выберем такую конфигурацию течения (т. е. фактически значения углов $\theta_2(\theta_3, R)$ и $\theta_4(\theta_3, R)$), для которой ограниченный окружностью участок AOB разветвляющейся линии тока в отходящих струях имеет наименьшую длину. Численные расчеты показали, что в этом случае $\theta_2(\theta_3, R) \rightarrow \theta_2^*(\theta_3)$ и $\theta_4(\theta_3, R) \rightarrow \theta_4^*(\theta_3)$ при $R \rightarrow \infty$, причем практически уже при $R/a_1 =$

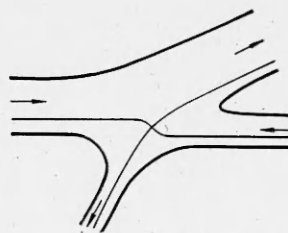


Рис. 4

$= 8-10$ результат не зависит от R . Значения θ_2^* и θ_4^* углов наклона отходящих струй неплохо соответствуют экспериментальным результатам, что, в частности, видно из рис. 2 (кривая 2) и рис. 3. Таким образом, численное моделирование задачи о несимметричном соударении струй в совокупности с экспериментальными результатами позволило сформулировать следующую гипотезу: при косом соударении плоских струй идеальной несжимаемой жидкости из возможных реализуется такая конфигурация течения, для которой участок разветвляющейся линии тока в отходящих струях, ограниченный проведенной из точки полного торможения потока окружностью достаточно большого радиуса, имеет наименьшую длину (эквивалентным является условие минимальности кривизны этой линии тока).

Естественно, что данная гипотеза носит эмпирический характер и не имеет под собой точного теоретического обоснования. Нет оснований предполагать, что она будет хорошо описывать абсолютно все результаты по соударению струй, но заметим, что, помимо хорошего соответствия имеющимся экспериментальным результатам для углов наклона отходящих струй, существуют и другие положительные моменты. При косом соударении струй одинаковой ширины, согласно данной гипотезе, без какого-либо предварительного требования о симметричности возникающей конфигурации таковая реализуется автоматически. Кроме того, данная гипотеза описывает отмеченный выше экспериментальный результат, говорящий о том, что конфигурация струйного течения при его обращении в общем случае не сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милл-Томсон Л. М. Теоретическая гидродинамика. М.: Мир, 1964.
2. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979.
3. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы, каверны. М.: Мир, 1964.
4. Palatini A. Sulla confluenza di due vene. — Atti del R. Istit. Veneto di Sc. L. ed Arti, 1916, t. LXXV, p. 451.
5. Дремни А. Н., Михайлов А. Н. и др. Об отсутствии сплошных кумулятивных струй при волнообразовании на границе косоугольного соударения пластин. ВИНТИ, отд. науч. фондов, деп. № 2441—82.
6. Кинеловский С. А., Соколов А. В. Экспериментальное моделирование плоских струйных течений идеальной несжимаемой жидкости. — В кн.: Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1983, вып. 62.

Поступила 26/X 1984 г.

УДК 532.528

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОРОГ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖИДКОГО ОБЪЕМА

С. В. Стебновский, Н. Н. Чернобаев

(Новосибирск)

Проблеме динамической прочности жидкости посвящен ряд работ, в которых использовались статический [1], ультразвуковой [2, 3] и импульсный [4—8] методы измерения объемной прочности жидкости. Во всех случаях авторы стремились найти прочностные параметры откольного разрушения в жидкости, т. е. предполагалось, что