

**СИНЕРГЕТИКА.
ВИХРЕ - ВОЛНОВОЙ И СТРУКТУРНЫЙ
РЕЗОНАНС ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛ В
СПЛОШНОЙ СРЕДЕ.**

Проф. Басин М.А.

*Директор Научно-исследовательского центра
«Синергетика».*

*Санкт-Петербургский союз учёных
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская
наб., д. 5, оф.300*

Тел.: (812) 328-41-24), факс: (812)328-41-24

E-mail: basin@soft-tronik.spb.ru

*Работа выполнена при поддержке
Российских Фондов*

*РФФИ (гранты №№95-01-1582а, 96-06-80418а, 00-06-80077а).
РГНФ(гранты.№№00-03-36003а/Б, 03-03-00247а/Б, 07-03- а/Б)*

**SYNERGETICS.
VORTEX – WAVE AND STRUCTURAL RESONANCE
AT THE MOTION OF THE BODIES IN THE
CONTINUOUS MEDIUM.**

Prof. Mikhail A. Basin

*Director of Scientific Research Center “Synergetics” of Saint-
Petersburg Association of Scientists and Scholars.
199034 St.-Petersburg Russia Universitatskaya nab., 5 , Office 300
Tel.No +7 (812)3284124.: Fax.No:+7(812)3284124.:*

E-mail.: basin@soft-tronik.spb.ru

The work was supported by:

*The Russian Foundation of Basic Research
(Grants №№95-01-1582а, 96-06-80418а, 00-06-80077а).*

*The Russian Humanitarian Foundation
(Grants №№00-03-36003а/Б, 03-03-00247а/Б, 07-03- а/Б).*

Abstract.

This paper informs about the discovery of new phenomenon:

“Vortex – wave and structural resonance”.

The essence of this phenomenon consists in resonant non-linear interplay between dispersing waves and demarcations of environments (particularly, vapor and air cavities), arising in continuum, and vortex and mushroom patterns, forming in the medium near the boundaries of driving bodies.

Resonance interaction results in qualitative changes of characteristics of interacting objects, formation of new vortex - wave patterns and abnormal change of the forces, acting on the body.

Particularities of nonlinear resonance interaction appear most clear by the existence of angle points on the boundaries of the bodies, near which form new vortex and mushroom structures.

Characteristic example of vortex-wave and structural resonance is the regime of flow, arising near the hydrofoil, driving near the free surface of heavy liquid in the region of Froude numbers $0.4 < Fr_b < 0.565$. ($Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$,

where V_0 -velocity of relative motion of the body (hydrofoil) and liquid, $g = 9.81 \frac{m}{c^2}$ - gravity acceleration, b -hydrofoils chord) and relative depths of

submersion $\frac{h}{b} > 0.3$ and by $Fr_h \approx 1$; ($Fr_h = \frac{V_0}{\sqrt{gh}}$) for $\frac{h}{b} \leq 0.1$.

There were discovered theoretically and experimentally anomalous changes of hydrodynamic forces, acting on the body, and forming of complex vortex-wave and mushroom structures.

Theoretically analysis of the particularities of the vortex-wave and structural resonance at the motion of the body in stratificated liquid or gas allowed predict the relations between gradients of density, Froude numbers and relative depths, corresponding to the appearance of this anomalous flow regime.

It was discovered, that by the decreasing of the degree of non-homogeneity of liquid or gas the intensity of flow disturbances, corresponding to the vortex-wave and structural resonance, change small, but the region of resonance meanings of Froude numbers narrows, and their meanings tend to zero.

So, even by small degree of non-homogeneity of the medium and small relative velocities of bodies motion in consequence of the resonance

interaction the driving lifting body may stimulate in liquid (gas) medium significant concentrated vortex-wave disturbances, bringing to appearance of new resonance structures in the flow.

The detail investigation of these resonance phenomena and comparison of theoretically and experimentally data led to the creation of principally new classification of wave and vortex motions and to the creation of general conception of vortex-wave and structural resonance.

We succeeded in explaining as specifically form of vortex- wave and structural resonance also and transitional regime of cavitating flow near the hydrofoil, when the length of the cavity is near to its chord.

Analogous nonlinear resonance phenomena were observed also by the investigation of interaction of cavitating hydrofoils, by the non-stationary flow of bluff bodies, by the interaction of two and more hydrofoils, by the motion of the wing near the solid boundary and so on. Common for all investigated phenomena is the wave character of deformations of non-homogeneous medium, existence of resonance interaction between circulation flows near the bodies and wave motions in the media and the forming of new nonlinear resonance vortex-wave structures. This fact allowed us to consider these processes as different forms of manifestation of unknown earlier physically phenomena – vortex-wave and structural resonance.

The main conditions of such resonance phenomena arising are determined.

Fulfilled theoretically and experimentally investigations opened wide perspectives in the investigation of new forms of vortex-wave and structural resonance by the motion of the bodies in the multivendor atmosphere and plasma, at the investigation of biologically, social and ecologically systems, and also by the investigation of interaction of discovered vortex-wave resonance structures with another types of oscillating, wave and vortex motions, particularly, with oscillations of solid bodies in the liquid and vibrations of elastic constructions.

Аннотация.

В настоящей статье сообщается о новом физическом явлении:

«Вихре – волновой и структурный резонанс».

Сущность этого явления состоит в резонансном нелинейном взаимодействии волн и границ раздела сред (в частности, паровых и воздушных каверн), возникающих в сплошной среде, и вихревых и грибовидных структур, формирующихся вблизи границ движущихся объектов.

Резонансное взаимодействие приводит к качественному изменению характеристик взаимодействующих объектов, формированию новых вихре- волновых структур и аномальному изменению сил, действующих на движущееся тело.

Специфика нелинейного резонансного взаимодействия наиболее ярко проявляется при наличии у границ тел угловых точек, вблизи которых формируются новые вихревые структуры.

Характерным примером вихре – волнового и структурного резонанса является режим течения, возникающий около крыла, движущегося вблизи свободной поверхности весомой жидкости в диапазоне чисел Фруда $0.4 < Fr_b < 0.565$. ($Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$, где V_0 - скорость

относительного движения тела (крыла) и жидкости, $g = 9.81 \frac{m}{c^2}$ - ускорение силы тяжести, b - хорда крыла) и относительных глубин погружения $\frac{h}{b} > 0.3$ и при $Fr_h \approx 1$; ($Fr_h = \frac{V_0}{\sqrt{gh}}$) для $\frac{h}{b} \leq 0.1$.

В этом режиме теоретически и экспериментально обнаружены аномальные изменения гидродинамических сил, действующих на тело, а также формирование новых комплексные вихре – волновых и грибовидных структур.

Теоретический анализ особенностей вихре - волнового и структурного резонанса при движении тела в стратифицированной жидкости или газе позволил предсказать соотношения между градиентами плотности, числами Фруда и относительными погружениями, при которых возможно наступление этого аномального режима обтекания.

Было обнаружено, что при уменьшении степени неоднородности жидкости интенсивность возмущений потока, сопровождающих вихре – волновой и структурный резонанс, ослабевает незначительно, однако

зона резонансных величин чисел Фруда сужается, а их значения стремятся к нулю.

Таким образом, даже при малой степени неоднородности среды и небольших относительных скоростях движения тела вследствие обнаруженного резонансного взаимодействия движущееся несущее тело может вызывать в жидкой (газообразной) среде значительные концентрированные вихре - волновые возмущения, приводящие к появлению в потоке новых резонансных структур.

Подробное исследование указанных явлений и сопоставление теоретических и экспериментальных данных привело к созданию принципиально новой классификации волновых и вихревых движений и к формированию общей концепции вихре – волнового и структурного резонанса.

Удалось объяснить как специфическую форму вихре – волнового и структурного резонанса также и переходный режим кавитационного обтекания крыла, когда длина каверны близка к его хорде.

Аналогичные по характеру нелинейные явления были обнаружены также при взаимодействии кавитирующих крыльев, при нестационарном обтекании плохообтекаемых тел, при аэродинамическом взаимодействии двух или нескольких крыльев, при движении крыла вблизи экрана и в ряде других случаев.

Общим для всех вновь обнаруженных и исследованных течений является волновой характер деформаций неоднородной среды, существование резонансного взаимодействия между циркуляционными течениями около тел и волновыми движениями в неоднородной среде, а также формирование новых нелинейных резонансных вихре-волновых структур. Это позволило рассматривать описанные выше процессы как различные формы проявления неизвестного ранее физического явления: вихре - волнового и структурного резонанса.

Определены основные условия возникновения подобных резонансных явлений.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования открыли широкие перспективы в изучении новых форм вихре - волнового резонанса при движении тел в неоднородной атмосфере и плазме, в изучении биологических, социальных и экологических систем, а также в исследовании взаимодействия уже открытых вихре - волновых резонансных структур с другими видами колебательных, волновых и вихревых движений, в частности, с колебаниями твердых тел в жидкости, вибрациями упругих конструкций.

Содержание.

Введение. Общая характеристика явления вихре - волнового и структурного резонанса	7
1. Аномальные результаты расчётов по линейной теории гидродинамических характеристик крыла, движущегося вблизи свободной поверхности жидкости.	10
2. Рождение концепции вихре - волнового и структурного резонанса	22
3. Волновое резонансное число.	25
4. Качественный анализ нелинейных эффектов	29
5. Вихре-волновой и структурный резонанс в стратифицированной сплошной среде и вблизи твёрдых границ.	30
6. Теоретический анализ кавитации подводных крыльев в режиме вихре-волнового и структурного резонанса.	34
7. Результаты экспериментального исследования проявлений вихре-волнового и структурного резонанса.	40
8. Обобщённая концепция вихре - волнового и структурного резонанса.	44
Заключение	46
Литература	49

Введение.

Общая характеристика явления вихре - волнового и структурного резонанса.

Явления, связанные с возникновением волн и вихревых структур различной природы, широко изучаются в механике сплошных сред. Их источниками во многих случаях являются движущиеся в сплошной среде жесткие или деформируемые тела. В неоднородных средах могут при определенных условиях (например, при действии потенциальных внешних сил - гравитационных, электромагнитных) возникать волновые движения различных типов, в частности, диспергирующие волны, скорость перемещения которых зависит от их длины.

При взаимодействии объектов с жидкостью или газом в этих средах могут происходить фазовые переходы и возникать новые вихревые и грибовидные структуры и границы раздела сред (например, кавитация, образование капель, кристаллизация).

При теоретическом и экспериментальном исследовании тел, несимметрично обтекаемых жидкостью переменной плотности, нами обнаружено экспериментально и обосновано теоретически новое, не известное ранее явление, сущность которого состоит в резонансном нелинейном взаимодействии диспергирующих линейных и нелинейных волн и границ раздела сред (в частности, паровых и воздушных каверн), возникающих в сплошной среде, и вихревых структур, создающихся вблизи тела, которое приводит к качественному изменению течения вокруг тела, формированию новых нелинейных вихре - волновых структур и резкому изменению действующих на движущееся тело гидро- аэродинамических сил. Специфика нелинейного взаимодействия наиболее ярко проявляется при наличии у движущегося тела угловых точек, формирующих новые вихревые структуры, в частности, острой задней кромки.

Характерным примером вихре – волнового и структурного резонанса (так было названо это явление) является режим течения, возникающий при определенных условиях около крыла, движущегося вблизи свободной поверхности весомой жидкости. В диапазоне чисел Фруда $0.4 < Fr_b < 0.565$.

($Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$, где V_0 - скорость относительного движения тела (крыла) и жидкости, $g = 9.81 \frac{m}{c^2}$ - ускорение силы тяжести,

b -хорда крыла) и относительных глубин погружения $\frac{h}{b} > 0.3$ и при

$Fr_h \approx 1; (Fr_h = \frac{V_0}{\sqrt{gh}})$ для $\frac{h}{b} \leq 0.1$, когда сопутствующая крылу волновая

деформация границы раздела, перемещающаяся со скоростью движения крыла, имеет длину присоединенной волны, соизмеримую с его хордой, наблюдается нелинейное резонансное взаимодействие вихревого циркуляционного течения вблизи крыла с волновыми деформациями на границе жидкости, приводящее к их многократному взаимному усилению. В этом случае возникает новый, не наблюдавшийся при других условиях режим обтекания крыла, формируются резонансные вихре - волновые структуры и происходят аномальные изменения гидродинамических сил, действующих на крыло.

Наряду с изучением движения несимметрично движущегося тела вблизи свободной поверхности воды был выполнен теоретический анализ возможности появления вихре - волнового резонанса при движении крыла в стратифицированной жидкости и предсказано соответствие между градиентами плотности, числами Фруда и относительными погружениями, при которых возможно наступление этого аномального режима обтекания.

Было обнаружено, что при уменьшении степени неоднородности стратифицированной жидкости интенсивность явлений, определяющих вихре - волновой резонанс, ослабевает незначительно, однако, зона резонансных значений чисел Фруда сужается, а их величины стремятся к нулю.

Таким образом, даже при малой степени неоднородности среды и небольших относительных скоростях движения тела вследствие обнаруженного резонансного взаимодействия движущееся несущее тело может вызывать в жидкой (газообразной) среде значительные концентрированные вихре - волновые возмущения, приводящие к появлению новых резонансных структур потока.

Подробное исследование указанных явлений и сопоставление теоретических и экспериментальных данных привело к новой концепции вихревых ударных волн и вихре - волнового и структурного резонанса и позволило определить основные условия возникновения резонансных явлений подобного рода. Удалось объяснить как специфическую форму вихре - волнового резонанса переходный режим кавитационного обтекания крыла, когда длина каверны, возникающей

на крыле в районе носика профиля, близка к его хорде. В этом режиме наблюдается резкое увеличение толщины каверны, которая может рассматриваться как специфическая нелинейная волна, а также значительное увеличение подъемной силы крыла.

Резонансный режим обтекания в этом случае сопровождается резким усилением колебаний размеров каверны и сил, действующих на крыло. Нестационарная зона потока, которая при других режимах кавитационного обтекания с присоединенной каверной охватывает лишь хвостовую часть каверны, при значениях длины каверны, близких к величине хорды крыла, резко увеличивается. При этом большие значения и интенсивные колебания гидродинамических сил, действующих на крыло, становятся главной характерной чертой течения. В этом случае также формируются новые резонансные вихре - волновые структуры.

Общим для всех вновь обнаруженных теоретически и исследованных экспериментально течений является волновой характер деформаций неоднородной среды, а также существование резонансного режима, связанного с взаимным усилением взаимодействия между циркуляционными течениями около крыла и волновыми движениями в неоднородной среде, а также формирование новых комплексных нелинейных резонансных вихре - волновых структур, которые отсутствовали при нерезонансных режимах движения.

Это позволяет рассматривать описанные выше процессы как различные формы проявления неизвестного ранее физического явления, названного нами вихре - волновым и структурным резонансом.

Были определены общие необходимые условия возникновения вихре - волнового и структурного резонанса и введен специальный параметр, характеризующий соотношение скоростей и длин диспергирующих волн в сплошной среде и движущихся тел или вихревых структур. Параметр выбран таким образом, что его резонансное значение равно единице.

Широкие перспективы открываются для обнаружения и изучения новых форм вихре – волнового и структурного резонанса при движении тел в неоднородной атмосфере, в плазме, в изучении химических процессов, биологических, социальных и экологических систем, а также в исследовании взаимодействия уже открытых вихре - волновых резонансных структур с другими практически важными видами колебательных, волновых и вихревых движений, в частности, с колебаниями твердых тел в жидкости, вибрациями упругих

конструкций, полями, образующимися при движении тел в сплошной среде. Выполненные исследования существенно расширили представления о взаимодействии волн и структур, а также позволили разработать новые подходы к исследованию сложных самоорганизующихся транспортно-информационных систем.

Открытое явление может быть источником новых изобретений, некоторые из которых уже запатентованы в настоящее время.

1. Аномальные результаты расчётов по линейной теории гидродинамических характеристик крыла, движущегося вблизи свободной поверхности жидкости.

Исследованию волновых движений в сплошной среде посвящена обширная литература, в том числе и большое количество монографий (см., например, [1], [50-52], [55], [81], [89], [113]). И хотя первичный анализ линейных моделей волновых течений в неоднородных средах не указывал прямо на наличие какого-либо резонансного взаимодействия возникающих волновых движений между собой, однако, в последние десятилетия рядом ученых было открыто и широко исследовано резонансное взаимодействие нелинейных поверхностных и внутренних гравитационных волновых движений. О. М. Филлипсом, М. Лонге-Хиггинсом, Д. Бенни, В. Е. Захаровым, А. Б. Шабатом, Л. М. Бреховских и его группой, Дж. Уиземом и другими исследователями был теоретически предсказан, а затем экспериментально подтвержден и подробно изучен нелинейный волновой резонанс между поверхностными и (или) внутренними волнами [2]. Им удалось обнаружить теоретически и исследовать экспериментально условия возникновения волнового резонанса. Такими условиями, справедливыми как для поверхностных, так и для внутренних волн, явились следующие [2].

$$\bar{k}_1 + \bar{k}_2 = \bar{k}_3 + \bar{k}_4$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$$

Здесь $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \omega_1, \omega_2$ - волновые векторы и частоты двух взаимодействующих волновых движений; $\bar{k}_3, \bar{k}_4, \omega_3, \omega_4$ - волновые векторы и частоты резонансных волн.

Автором более 20 лет назад была высказана гипотеза о том, что значительно более интенсивные резонансные взаимодействия возможны при взаимодействии движущихся тел с диспергирующими волнами, возникающих в сплошной среде.

Классические методы изучения взаимодействия тел, движущихся в весоной жидкости, с волновыми системами, создаваемыми на свободной поверхности, основанные на линейной теории волн, были разработаны еще в конце прошлого века и интенсивно развивались вплоть до последнего времени, в частности, применительно к исследованию судовых волн [3]- [8].

Теоретическое и экспериментальное исследование волн, образующихся при движении судна при значениях чисел Фруда по длине судна, $Fr_L = \frac{V_0}{\sqrt{gL}}$, (где L - длина судна в метрах), близких к 0.5,

позволило обнаружить интерференционную картину взаимодействия судовых поперечных волн, когда носовая волна усиливает кормовую и растет волновое сопротивление судна. При этом половина длины поперечной волны, создаваемой движущимся судном, оказывается равной длине судна. Однако это явление не рассматривалось ранее как резонансное, в основном, вследствие отличия от общепринятого представления о резонансном взаимодействии колебательной системы с внешним периодическим воздействием. Его описание выполнялось с помощью линейной теории, результаты которой не указывают прямо на резонансный характер взаимодействия. В данном случае ранее говорилось лишь о благоприятной или неблагоприятной интерференции линейных волн, так как никакого дополнительного усиления интенсивности источников, заменяющих судно, в линейной модели не учитывалось.

С наших современных позиций и это явление может рассматриваться как резонансное, так как усиление интенсивности волн, вызванных движением тела, в данном случае также носит характер волнового резонанса. При постоянной скорости движения тело захватывает с собой волну (или спектр волн заданной формы) с длиной, однозначно определённой скоростью движения тела - возникает резонанс по скорости. При этом амплитуда захваченной волны пропорциональна коэффициенту Фурье в интеграле Фурье, которым может быть представлено граничное условие на поверхности тела, соответствующем длине захваченной волны. Этот коэффициент достигает максимума, когда длина тела близка к длине резонансно захваченной телом волны [50], [89], тем самым вследствие двойного

резонанса по скорости и длине волны при поступательном движении тела в этом случае наблюдается интенсивное волнообразование и максимальные значения сопротивления движению тела. Существенные особенности, которые будут рассмотрены ниже, приобретает картина течения около тела при движении в жидкости ограниченной глубины, в которой существует предельное значение скорости распространения волн, определяемое условием равенства числа Фруда по глубине единице.

Картина меняется при движении вблизи свободной поверхности или глиссировании несимметрично обтекаемого несущего тела. Постановка и общее решение такой задачи были выполнены в ряде классических работ, в частности Н.Е. Кочина [5], М.В. Келдыша и М. А. Лаврентьева [9] и Л.И.Седова [10]. Несмотря на линеаризацию задачи, получение однозначного её решения без дополнительных допущений оказывается невозможным. При её рассмотрении вводится дополнительное нелинейное условие на поверхности крыла - конечность скорости в районе острой задней кромки (условие Жуковского – Чаплыгина - Кутта). Выполнение этого граничного условия, сохраняя при линеаризации граничных условий на крыле и свободной границе линейную зависимость характеристик потока от угла атаки, приводит к нелинейной обратной связи между циркуляцией на поверхности крыла и параметрами волновой системы, образующейся при его движении вблизи свободной поверхности жидкости.

Численные расчеты гидродинамических характеристик подводных крыльев выполнялись различными авторами первоначально лишь для сравнительно больших глубин погружений крыла и предельных случаев больших или очень малых значений числа Фруда по хорде крыла Fr_b [11-17]. Это было связано с практическими потребностями - суда на подводных крыльях имеют основной режим движения, соответствующий большим значениям числа Фруда. Попытки выполнения расчетов при малых погружениях и произвольных значениях чисел Фруда приводили к значительным математическим трудностям, связанным с необходимостью вычисления сложных волновых интегралов и решением сингулярных интегральных уравнений теории крыла. Часть этих трудностей была преодолена в конце пятидесятых, в начале шестидесятых годов, когда А.Б. Лукашевичем [18], А. Н. Панченковым [19], Т.Нишиямой [20], В. Исаи [21] и др. в дополнение к данным М.В. Келдыша и М.А. Лаврентьева были выполнены отдельные расчеты гидродинамических

характеристик крыла, движущегося вблизи поверхности несжимаемой жидкости. Обобщение этих результатов было представлено в монографиях [18, 22].

Однако, выполнить расчеты гидродинамических характеристик подводного крыла во всем диапазоне чисел Фруда и относительных глубин погружения не удавалось долгое время ни одному из специалистов. Лишь в конце 70-х, начале 80-х годов подобные расчеты были выполнены в США [23] при отработке численных методов решения нелинейных волновых задач. При этом был обнаружен диапазон параметров потока, при котором нелинейные численные методы не дают сходящегося решения.

В 1982 году на организованной М. А. Басиным и Ю. И. Фаддеевым конференции: “Гидродинамика подводного крыла и глиссирующих поверхностей” М. А. Басиным [24], А. Я. Ткачом [25], М. А. Макасеевым [26], М. В. Лотфуллиным [27], А. Н. Лордкипанидзе [28] были сделаны доклады по результатам расчетов гидродинамических характеристик крыла, движущегося вблизи свободной поверхности несжимаемой жидкости. (Эти расчеты были заказаны организаторами конференции). Результаты выполненных исследований показали существование диапазона значений чисел Фруда и относительных глубин погружения крыла, при котором наблюдается аномальное поведение гидродинамических характеристик крыла. В дальнейшем М. А. Басин, А.Н. Лордкипанидзе и А.Я. Ткач [29-31], [68-73], усовершенствовав расчетные схемы с использованием квадратурных формул Корнейчук –Мишкевича -Гур-Мильнера [32-34], провели в рамках линейной теории систематические расчетные исследования по изучению влияния числа Фруда, относительного заглубления, угла атаки, формы и толщины профиля, а также удлинения крыла на его суммарные и распределенные гидродинамические характеристики при движении вблизи свободной поверхности воды. Позднее аналогичные расчеты по линейной и нелинейной теории были выполнены М.В. Лотфуллиным, .И. Филипповым, В.Г. Щигуновым [35-36].

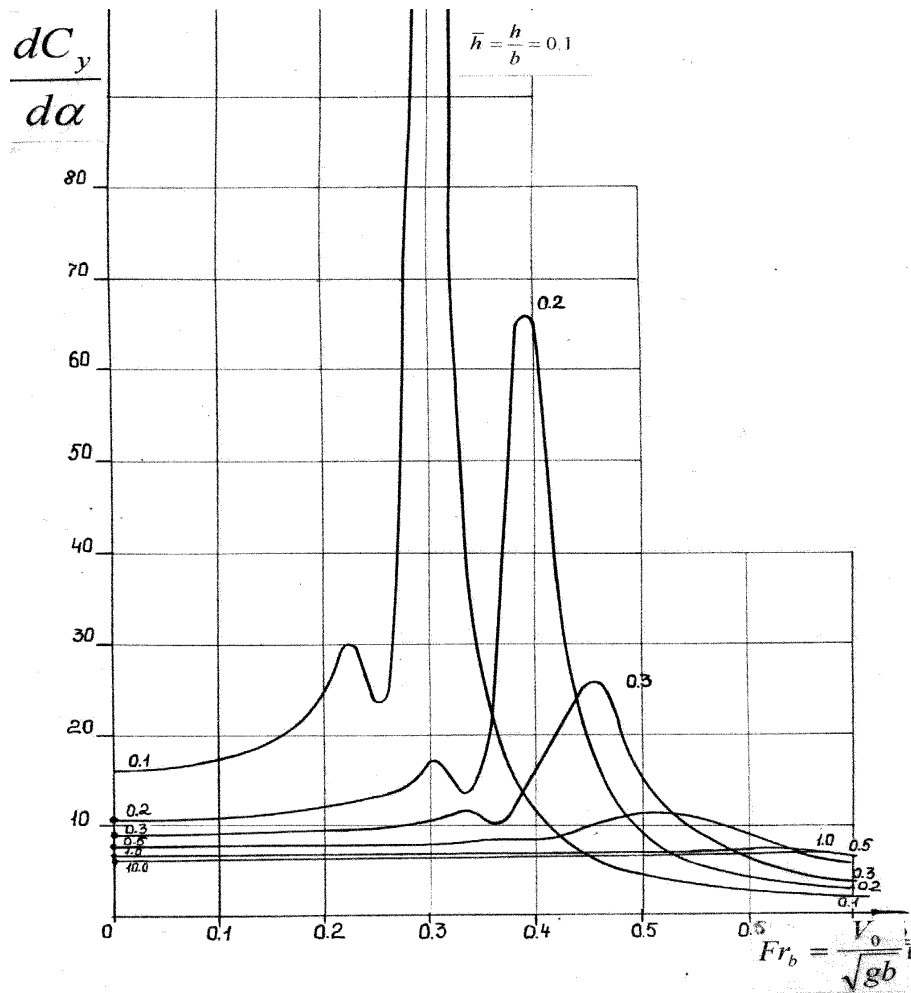


Рис .1. Расчетные графики зависимости производной от коэффициента подъемной силы по углу атаки $\frac{dC_y}{d\alpha}$ в функции от числа Фруда по хорде крыла $Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$ для тонкого профиля, движущегося под свободной поверхностью весомой жидкости при различных относительных заглублениях $\frac{h}{b}$ (результаты расчетов по линейной теории).

На рис. 1 представлены результаты расчётов по линейной теории зависимости производной от коэффициента подъемной силы по углу атаки $\frac{dC_y}{d\alpha}$ в функции от числа Фруда по хорде крыла $Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$ для тонкого профиля, движущегося под свободной поверхностью весомой жидкости при различных относительных заглублениях.

Как показали результаты расчетов, при приближении крыла к свободной поверхности воды, начиная с $\frac{h}{b} = 0.5$, при определенном для каждого из относительных заглублений числе Фруда по хорде крыла, уменьшающемся при уменьшении глубины погружения, наблюдается интенсивный рост производной $\frac{dC_y}{d\alpha}$ (где $C_y = \frac{Y}{\rho_L S V_0^2 / 2}$ - коэффициент подъемной силы крыла, Y - подъемная сила крыла, ρ_L - плотность жидкости, S - площадь крыла в плане).

Так, например, при относительном заглублении $\frac{h}{b} = 0.2$ и значении числа Фруда по хорде $Fr_b \approx 0.4$ линейная теория предсказывает более чем десятикратный рост $\frac{dC_y}{d\alpha}$ по сравнению со случаем безграничной жидкости. С уменьшением относительного заглубления теоретическое значение максимума кривой зависимости $\frac{dC_y}{d\alpha}$ от Fr_b резко увеличивается и даже стремится к бесконечности при $\frac{h}{b} \rightarrow 0$. Возникает режим с обострением [81].

Представляет интерес зависимость $\frac{dC_y}{d\alpha}$ от комбинированного числа Фруда, сформированного по площади жидкости над крылом

$$Fr_{hb} = \frac{V_0}{\sqrt{g\sqrt{hb}}}.$$

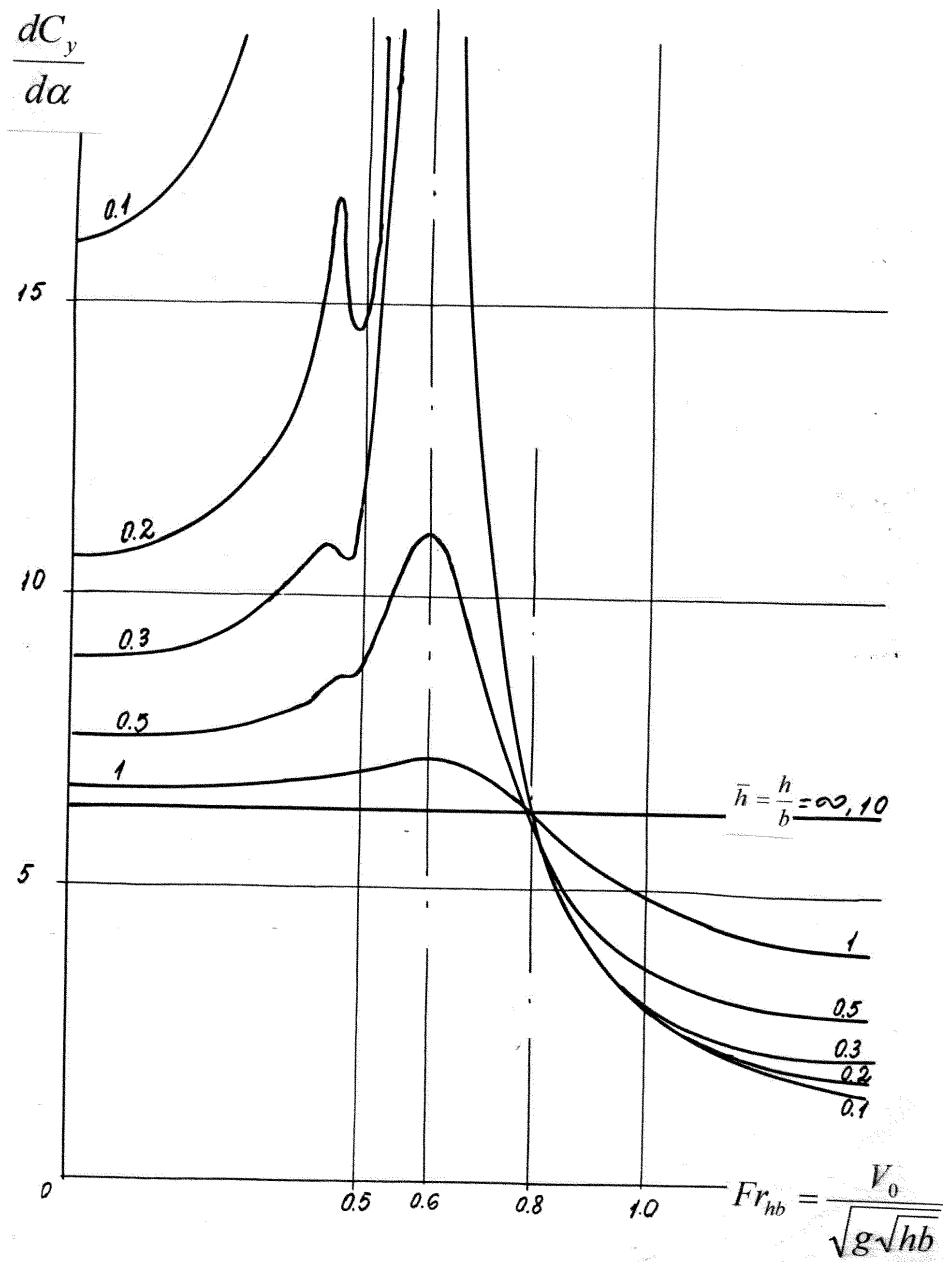


Рис.2. Расчетные графики зависимости производной от коэффициента подъемной силы по углу атаки $\frac{dC_y}{d\alpha}$ в функции от числа Фруда по хорде и заглублению крыла $Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{g\sqrt{hb}}}$ для тонкого профиля, движущегося под свободной поверхностью весомой жидкости при различных относительных заглублениях $\frac{h}{b}$ (результаты расчетов по линейной теории)

Положение пика $\frac{dC_y}{d\alpha}$ при почти всех значениях $\frac{h}{b}$, практически не изменяется и соответствует значению $Fr_{hb} \approx 0.6$. При значении $Fr_{hb} \approx 0.81$ заглублиение практически не влияет на подъемную силу крыла (все кривые зависимости $\frac{dC_y}{d\alpha}$ в функции от Fr_{hb} пересекаются практически в одной точке при значении $\frac{dC_y}{d\alpha} \approx 2\pi$)

Уменьшение удлинения крыла приводит к уменьшению величин резонансных пиков, однако, значения чисел Фруда, соответствующих наступлению резонансного роста значения $\frac{dC_y}{d\alpha}$ при этом практически не изменяются.

С уменьшением относительной глубины погружения резонансное значение числа Фруда по хорде уменьшается и стремится к нулю при очень малых заглублиениях, тогда как число Фруда по глубине - $Fr_h = \frac{V_0}{\sqrt{gh}}$ растёт и стремится к 1. В этом предельном случае крыло играет роль дна и резонансные значения числа Фруда приближаются к критическим значениям этого параметра на мелководье.

Аналогичные резонансные изменения силового воздействия на искривленные крылья (при несколько больших значениях чисел Фруда) были обнаружены в результате расчетов зависимости угла нулевой подъемной силы, определяемой кривизной профиля, от числа Фруда и относительной глубины погружения (рис.3). Если в диапазоне чисел Фруда Fr_b от единицы до бесконечности для тонкого профиля в виде дуги круга угол нулевой подъемной силы практически не меняется и имеет отрицательную величину, приближенно равную в радианах $\alpha_{of} = -2\bar{f}$, где $\bar{f} = \frac{f}{b}$ - максимальная относительная стрелка погиби дужки, то в диапазоне чисел Фруда от 0.4 до 0.8 наблюдается резкий рост угла нулевой подъемной силы, который при $\frac{h}{b} = 0.1$ становится положительным.

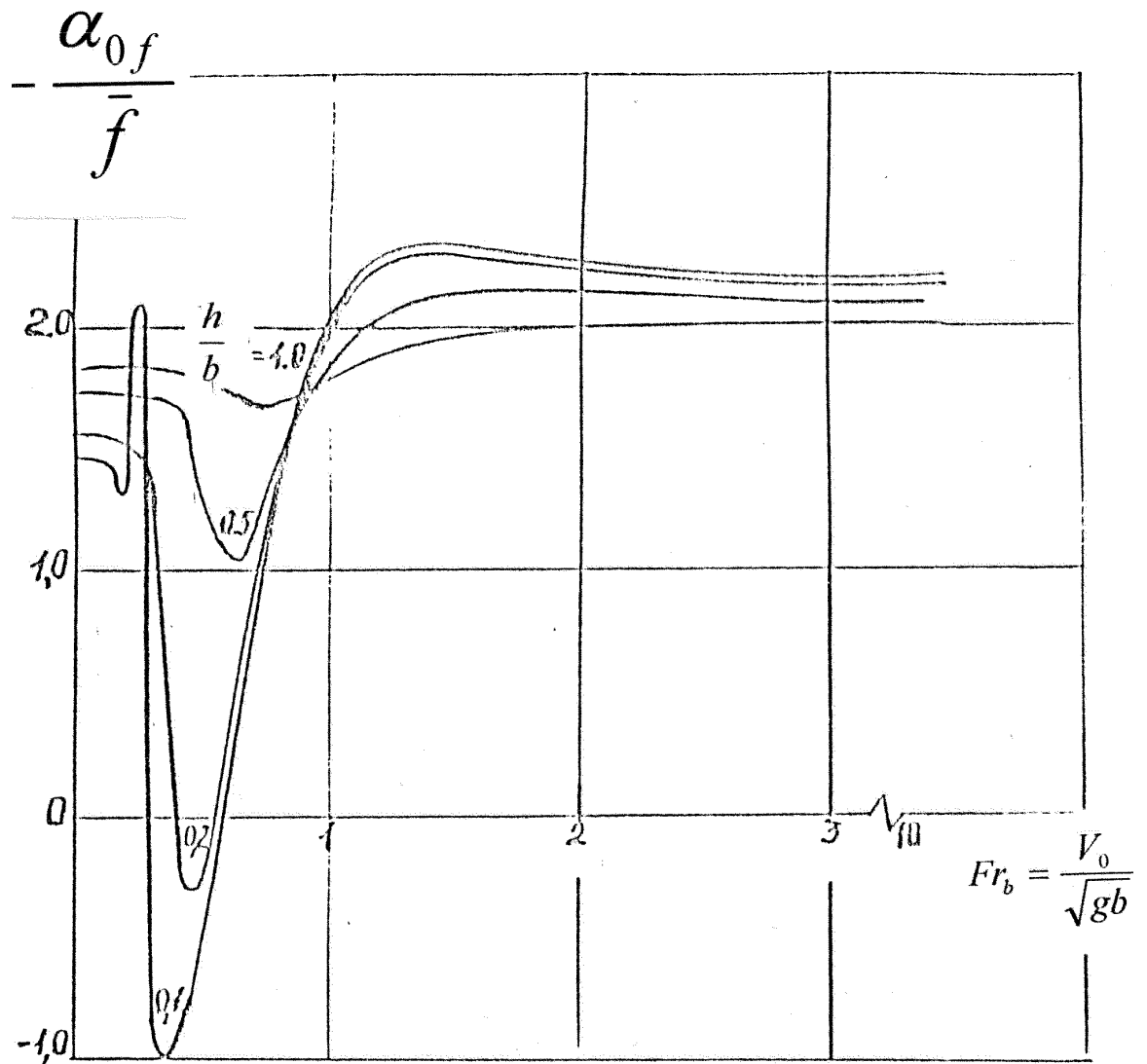


Рис. 3. Расчетные графики зависимости отношения угла нулевой подъемной силы α_{0f} (в радианах) тонкой параболической дужки, движущейся под свободной поверхностью весомой жидкости к её максимальной стрелке погиби $\bar{f} = \frac{f}{b}$ в функции от числа Фруда по

хорде $Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$ при различных относительных заглублениях $\frac{h}{b}$ (результаты расчетов по линейной теории).

Теория, таким образом, предсказывает парадоксальный результат. У тонкого профиля, имеющего форму выпуклой по направлению к свободной поверхности дужки, должна при $Fr_b \approx 0.4$ и $h/b \approx 0.1$ возникать не подъёмная, как обычно, а значительная топящая сила.

Еще более необычный резонансный эффект предсказывает линейная теория у крыльев с телесным профилем, имеющим относительную толщину $\bar{c} = \frac{c}{b}$.

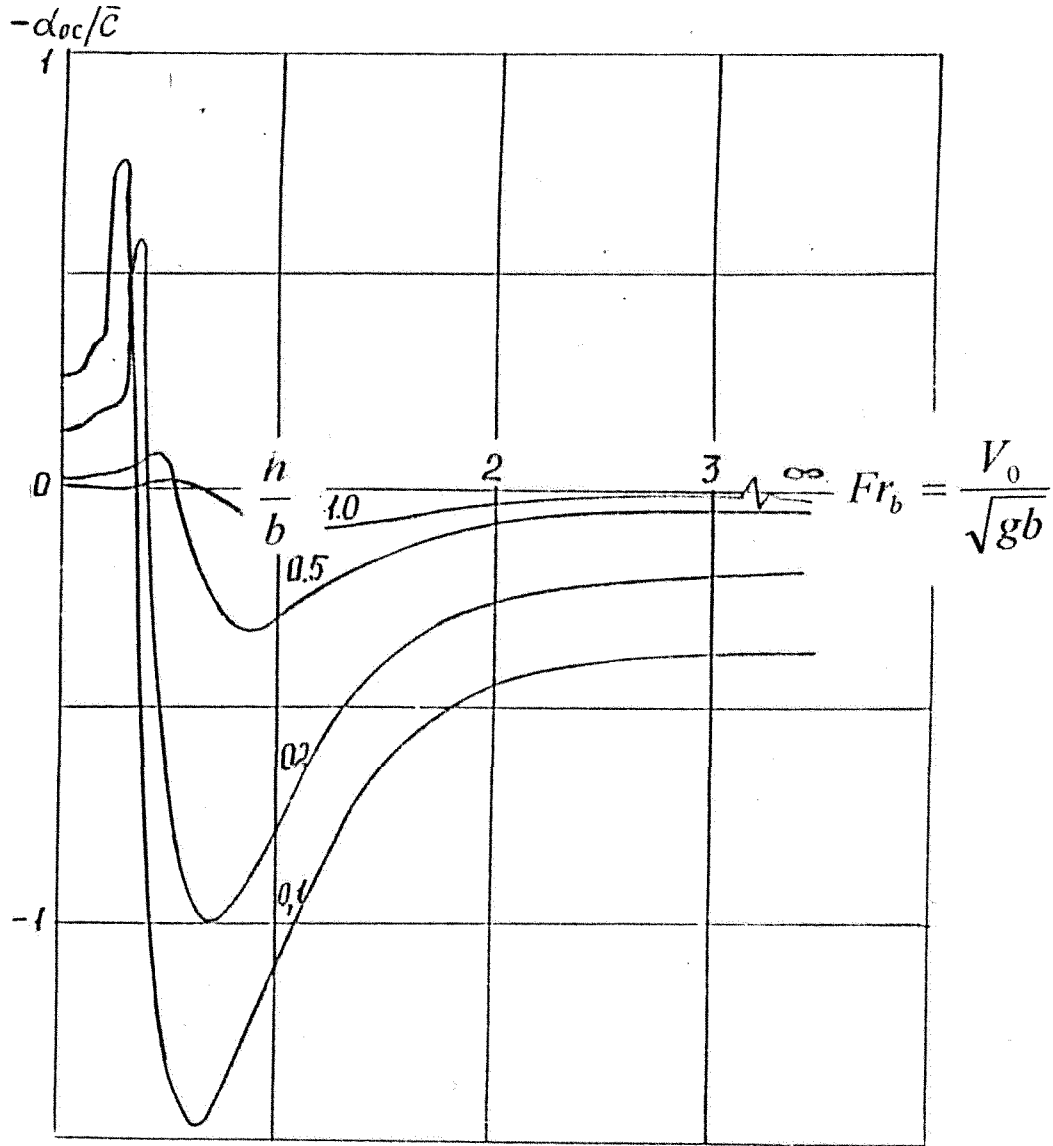


Рис. 4. Расчетные графики зависимости отношения угла нулевой подъемной силы α_{0c} (в радианах) тонкого симметричного профиля, движущегося под свободной поверхностью весомой жидкости, к его максимальной относительной толщине $\bar{c} = \frac{c}{b}$ в функции от числа Фруда по хорде $Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$ при различных относительных заглублениях $\frac{h}{b}$ (результаты расчетов по линейной теории).

У симметричных профилей крыльев при попадании в резонансный режим также обнаружено теоретически резкое изменение угла нулевой подъемной силы, который при незначительном увеличении числа Фруда совершает зигзагообразный скачок от большого отрицательного значения до еще большего (примерно в 2 раза) положительного значения.

Эти теоретические результаты, во-первых, должны были получить соответствующее физическое объяснение, а, во вторых, требовали экспериментальной проверки. Хотя имевшиеся разрозненные экспериментальные данные [23], [24], [28], [37] качественно подтверждали существование аномальных эффектов, однако, до выполнения расчетов подробный анализ этого режима не проводился.

С целью отыскания теоретического объяснения полученных результатов были выполнены расчеты распределения давлений по поверхности крыла в этом режиме и созданы дополнительные подпрограммы расчета деформации свободной поверхности воды вблизи крыла. Результаты последних приведены на рис.5.

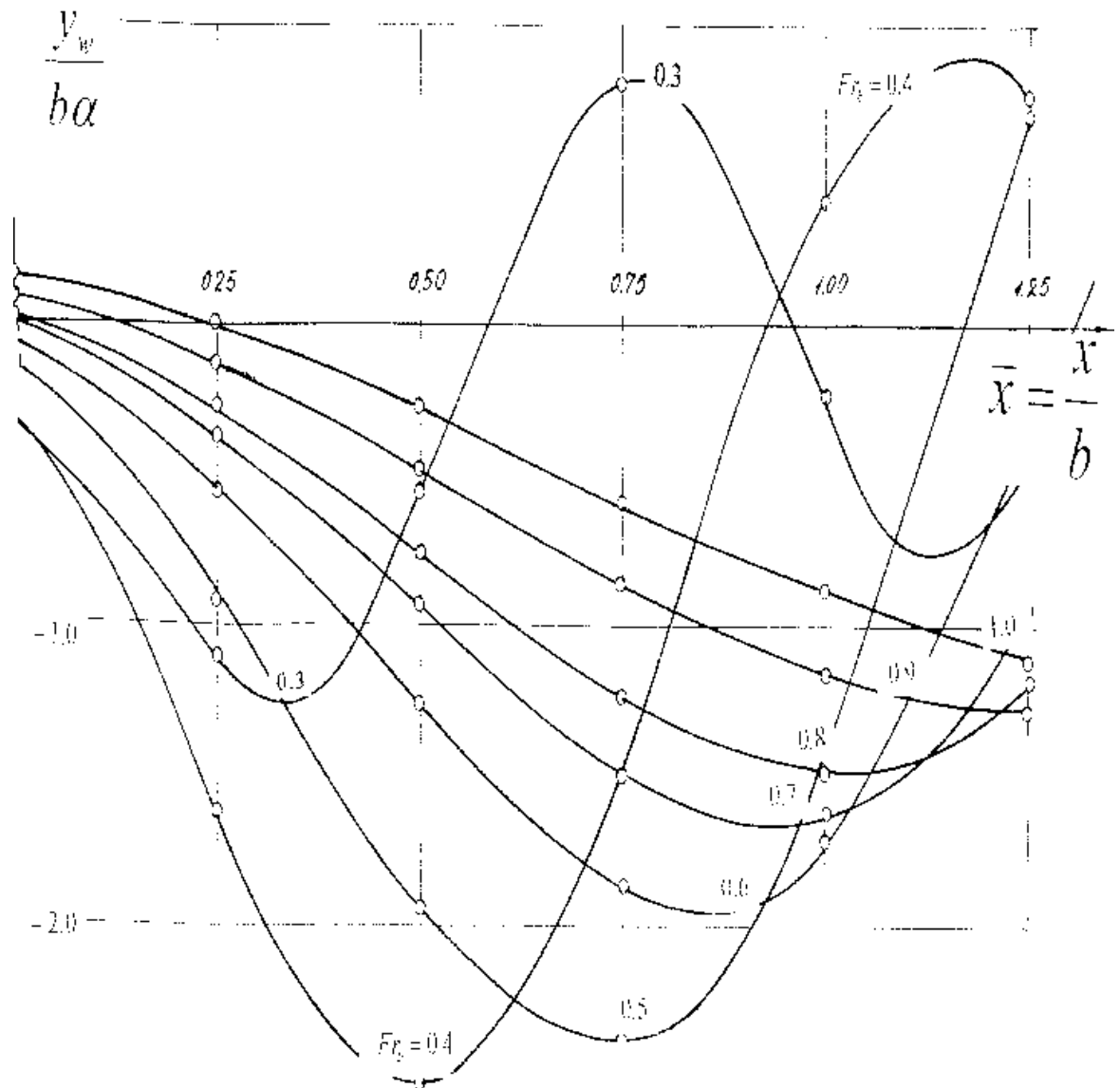


Рис.5. Результаты расчетов относительной деформации свободной поверхности тяжелой жидкости $\frac{y_w}{\alpha b}$ над тонкой плоской пластиной, обтекаемой под углом атаки α в зависимости от числа Фруда по хорде крыла $Fr_b = \frac{V_0}{\sqrt{gb}}$ при относительном заглублении $\frac{h}{b} = 0.2$ (результаты расчетов по линейной теории).

Эти расчеты показали, что главным критерием, определяющим условие максимального теоретического значения величины $\frac{dC_y}{d\alpha}$, является совпадение определенной части длины сопутствующей волны,

формирующейся на свободной поверхности, с хордой крыла. При этом для максимального воздействия на различные составляющие подъемной силы эта часть длины волны может оказаться различной, что несколько сдвигает по числам Фруда пики воздействия на $\frac{dC_y}{d\alpha}$ и на угол нулевой подъемной силы α_0 .

2. Рождение концепции вихре-волнового и структурного резонанса.

Результаты расчётов указывали на возможность того, что открытое явление имеет резонансный характер. Если принять, что этот резонансный режим имеет волновую природу, то целесообразно было ввести некоторую аналогию с нелинейным волновым резонансом, открытым ранее.

Для того, чтобы провести соответствующую аналогию, необходимым оказалось расширить представление о волновых движениях, связанных с перемещением твердых тел в жидкостях, проанализировать с новых позиций формирование циркуляции на поверхности крыла и вывести на основе этих результатов критерии резонансного взаимодействия несущих тел с линейными и нелинейными волнами, возникающими в сплошной среде. Кроме того, волны, формирующиеся вблизи крыла даже при достаточно малых величинах углов атаки, относительной кривизны профиля и относительной толщины крыла, рассчитанные в соответствии с линейной теорией, оказываются выше предельных нелинейных волн.

Попытки расчёта нелинейных волн для этого режима численными методами, выполненные американскими авторами [23], а затем В. Г. Щигуновым [36], показали, что вблизи этого режима существующие методы решения нелинейных задач не дают устойчивой картины течения, то есть появляются разрушающиеся волны. Отсутствие аналитических и численных методов полного расчёта параметров обнаруженного режима течения предопределило качественные методы анализа как физических причин самого резонансного явления, так и его нелинейных последствий. Тем более, что предварительные экспериментальные исследования обтекания крыла в обнаруженном режиме показали, что при взаимодействии крыла со свободной поверхностью формируются отсутствовавшие при

нерезонансном режиме вихре - волновые структуры, изучение которых требует новых методов исследования.

В последние годы интенсивно развиваются новые качественные методы исследования нелинейных волновых течений. Проанализирована связь между ударными и солитонными волнами и обычными линейными волновыми явлениями. Возникла новая наука, синергетика, изучающая условия самоорганизации нелинейных систем (см., например, [82-90].)

Созданная автором новая классификация волн, вихревых и грибовидных структур, а также транспортно-информационных систем [38], [39], [84] позволила ему рассматривать движение твердого тела в жидкости как особую форму нелинейной поверхностной уединенной волны, перемещающейся относительно частиц жидкости со скоростью, равной скорости движения тела.

Основным геометрическим параметром этой нелинейной волны является габаритный размер тела в направлении перемещения. Особенность рассматриваемой нелинейной волны состоит в том, что вблизи границы твердого тела наряду с полем скоростей и давлений формируется также область завихренности, образующая тонкий пограничный слой .

На границе твердого тела всегда имеются, как минимум, две так называемые “критические точки” (или точки изменения знака завихренности), то есть точки, в которых интенсивность завихренности, образующейся вблизи поверхности тела, имеет нулевое значение. В этих точках, вблизи которых скорость жидкости в области незавихренного течения близка к скорости движения тела (скорости волны), возможно появление неустойчивости вихревого движения. Вблизи этих зон создается условие для возникновения двойных спиральных вихрей («вихревых ударных волн первого рода»). Впервые приближенное математическое описание возникновения подобного рода волн на границе жидкости было дано М.А. Басиным и Н. Ю. Завадовским в работе [40], в которой удалось установить аналогию между формированием двойного спирального вихря на границе потенциального течения жидкости и ударной волной, что явилось причиной названия - “вихревые ударные волны первого рода”.

Благодаря диффузии завихренности спиральные вихри превращаются в концентрированные вихревые структуры - вихревые пузыри. Образование вихревых пузырей характеризует возникновение специфической, не исследовавшейся ранее подробно формы потери энергии в вязкой жидкости, связанной с взаимодействием конвекции и

диффузии завихренности внутри вихревого пузыря.

В случае несимметричного обтекания крыла образование вихревой ударной волны первого рода (вихревого пузыря) вблизи острой задней кромки на засасывающей поверхности крыла приводит, благодаря нелинейному взаимодействию с основным потоком, к появлению новых слоев раздела («вихревых ударных волн второго рода»). Они возникают благодаря перезамыканию (слипанию существовавших до этого раздельно вихревых пограничных слоев, сходящихся с нагнетающей и засасывающей поверхностей крыла.

В результате слипания происходит отделение вихревого пузыря от движущегося тела и формирование новой вихревой структуры, названной нами «вихревой нейтральной грибовидной структурой». Она состоит из присоединенной замкнутой вихревой волны, движущейся вместе с крылом, отделившегося от нее разгонного вихря (вихревой волны первого рода) и соединяющей их тонкой двухслойной вихревой пелены (вихревой волны второго рода) в двумерном случае. При обтекании крыла конечного размаха вихревая пелена окаймляется постоянно формирующимися концевыми концентрированными вихревыми пузырями (вихревыми ударными волнами первого рода).

В результате этого процесса в системе координат, связанной с крылом, вблизи него реализуется почти установившееся течение с циркуляцией, определяемое из условия – Жуковского - Чаплыгина Кутта на задней кромке [45-48].

Изложенная выше схема использована автором совместно с И. Г. Шапошниковым для разработки новой нелинейной модели нестационарного обтекания крыла в рамках невязкой жидкости [41].

Ранее из подобных волновых представлений о формировании циркуляции на поверхности крыла исходил один из основоположников теории крыла – Ф. Ланчестер [42-44]. Однако, в дальнейшем, благодаря успехам, достигнутым в локальном анализе характеристик крыльев, основанном на гипотезе Жуковского – Чаплыгина - Кутта [44-48], волновому характеру обтекания крыла внимания уделялось мало.

Значительно усложняется картина течения при движении крыла вблизи свободной поверхности жидкости, которая является новым, дополнительным источником волновых движений. Обычно гравитационные волны малы и для их анализа достаточно применения результатов линейной теории. Однако при увеличении амплитуды и энергии гравитационных волн в районе их гребней интенсифицируется вихревое движение, и локальная скорость в этой зоне становится близкой к скорости перемещения волны. Предельной теоретически

возможной стационарной гравитационной волной на глубокой воде является волна Стокса с $\bar{h}_w = \frac{h_w}{\lambda} = 0.1432$ (h_w - высота волны, λ - её длина), в вершине которой, как и при обтекании движущегося твердого тела, образуется критическая точка, скорость жидкости в которой равна скорости волны. Дальнейшее увеличение энергии гравитационной поверхностной волны приводит к появлению в её вершине сверхкритических скоростей, формированию вихревых ударных волн, присоединенных к основной волне - к частичному или полному разрушению волн [49-55].(разрушение поверхностной волны вследствие неустойчивости наступает несколько раньше)

Разрушение нелинейных гравитационных поверхностных волн, начиная с некоторых величин переносимой ими энергии, становится во многом эквивалентным развитию вихревых ударных волн при несимметричном циркуляционном обтекании тела. Таким образом, вихревое обтекание тела с формированием на его поверхности циркуляционного течения и поток, создаваемый гравитационными волнами, возникающими на поверхности жидкости, могут рассматриваться с единых позиций как нелинейные волны, связанные с деформацией или перемещением границ раздела сред.

3. Волновое резонансное число.

Указанный подход позволил отождествить твердое тело, несимметрично обтекаемое потоком жидкости, с уединенной поверхностной волной, скорость которой C_B равна скорости перемещения, а длина пропорциональна длине тела .

$$C_B = V_0, \lambda_B = m_b b_b, \text{ где } 1 < m_b < 2.$$

Это допущение подтверждается выполненной в [50] предварительной оценкой характера обтекания препятствия заданной длины, где показано, что максимальным весом в разложении линейного граничного условия в интеграл Фурье обладают волны , длина которых близка к длине обтекаемого препятствия.

Тогда можно приближенно определить частоту и волновой вектор эквивалентной движущемуся крылу присоединённой вихревой волны:

- волновой вектор $\bar{k}_b = \frac{2\pi}{m_b b_b} \frac{\bar{V}_0}{V_0}$,

- частота $\sigma_b = \frac{2\pi V_0}{m_b b_b}$.

После такого отождествления легко определить заранее, не решая предварительно задачи, диапазон чисел Фруда, при котором можно ожидать появление резонансного взаимодействия.

Параметры свободных волн, движущихся в несжимаемой жидкости бесконечной глубины, связаны известными выражениями

$$k_w = \frac{2\pi}{\lambda_w} = \frac{\sigma^2}{2\pi g}; \sigma = \frac{2\pi C_w}{\lambda_w}.$$

В качестве условия появления вихре - волнового и структурного резонанса при установившемся движении крыла будем считать равенство скоростей тела и присоединенной гравитационной волны ($C_B = C_w$), а также соизмеримость размеров присоединенной волны в районе тела с его длиной (длина тела должна составлять определенную часть присоединенной волны, приблизительно от 0.5 до 1). Приравнявая скорости движения и длины волн движущегося тела и свободной гравитационной волны в жидкости, получаем приближенное условие возникновения нелинейного вихре - волнового резонанса

$$Fr_{bres} = \frac{V_0}{\sqrt{g b_b}} = \sqrt{\frac{m_b}{2\pi}}.$$

Если предположить, что величина m_b должна изменяться в пределах от 1.0 до 2.0, то получаем: $0.4 < Fr_b < 0.565$.

Именно в этом диапазоне чисел Фруда наблюдаются основные резонансные явления при движении крыла в диапазоне относительных глубин $0.3 < \frac{h}{b} < 0.5$. Сдвиг в критических значениях числа Фруда, соответствующих максимуму влияния на α_0 относительной толщины профиля, объясняется различным характером резонансного взаимодействия.

При меньших значениях относительных глубин $\frac{h}{b} \leq 0.1$ характер волнового движения вблизи крыла несколько изменяется. Крыло, являясь источником возмущения, одновременно начинает играть роль локального дна, расположенного на малой глубине под свободной

поверхностью воды. В этом случае характер поверхностных волн, их поведение вблизи крыла становятся все ближе к поведению волн на предельном мелководье, скорость которых в пределе соответствует величине $C_B = \sqrt{gh}$, где h - глубина воды, в данном случае - глубина погружения крыла. Именно поэтому с уменьшением глубины погружения происходит уменьшение резонансного значения числа Фруда по хорде крыла и увеличение со стремлением к единице резонансного значения числа Фруда по глубине.

Аналогичные рассуждения могут быть проведены в общем случае движения тела в сплошной среде (поле), внутренняя динамика которого описывается некоторым линейным или нелинейным оператором, воздействующим на полевые потенциалы. В поле вне движущегося тела обычно выполняется то или иное дифференциальное уравнение в частных производных для основной функции распределения параметра, определяющего характеристики потока.

$$L(u) = 0,$$

где $L(u)$ - некоторый линейный или нелинейный оператор. Этому оператору обычно соответствует некоторый собственный спектр линейных и нелинейных волн или структур, между элементами которых существует система спектральных соотношений

$$B(\omega, k) = 0,$$

где ω и k частоты и волновые числа элементарных волн, которые могут быть возбуждены в сплошной среде (поле).

Решая последнее уравнение относительно ω , получаем

$$\omega = \varphi(k) = \varphi\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)$$

Скорость перемещения этих волн определяется однозначно их длиной

$$C_w = \frac{\omega(k)}{k} = \frac{2\pi\varphi\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)}{\lambda} = f(\lambda)$$

При равномерном поступательном движении тела картина волн, формирующихся вблизи тела такова, что она перемещается вместе с телом, оставаясь неизменной. Это явление было названо нами резонансом по скорости.

Отсюда на основании условия резонанса по скорости может быть определена структура волн, присоединённых к телу, или в частном

случае, одной резонансной волны присоединенной к телу, что и было сделано рядом авторов для случая корабельных волн [15], [50].

Волны других длин имеют скорости, меньшие или большие, скорости движения тела, и в случае двумерного обтекания уходят от тела вперед и назад. С телом движется лишь одна волна при плоском обтекании (или лишь одна волновая картина в трёхмерном случае).

Максимальная резонансная амплитуда присоединённых к телу волн вследствие резонанса по длине тела должна наблюдаться, если длина тела соизмерима с длиной присоединённой волны .

Тогда можно определить резонансную скорость волны по вторичному резонансу (резонансу по длинам волн).

$$C_{wR} = \frac{\omega(k)}{k} = \frac{2\pi\varphi\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)}{\lambda} = f(mb)$$

Эта скорость совпадает также со скоростью, при которой возникает вихре - волновой резонанс у подводного крыла, так как размеры вихревого пограничного слоя, формирующего циркуляционное течение, совпадают с размерами крыла. Тем самым, можно заранее предсказать скорость движения тела, соответствующую вихре -волновому и структурному резонансу.

Исходя из полученного общего результата, можно ввести единый резонансный параметр, характеризующий как структурно-волновой, так и вихре – волновой и структурный резонансы.

Этот резонансный параметр назовём

«Волновым резонансным числом».

$$C_R = \frac{V_0}{C_{wR}} = \frac{V_0}{f(mb)}.$$

Если волновое резонансное число равно единице или находится вблизи неё,

то $C_{wR} = V_0$,

и это в общем случае является необходимым условием возникновения вихре - волнового и структурного резонанса.

Конкретный вид резонансного числа зависит от дисперсионного соотношения в сплошной среде. В частности, при движении тела в сжимаемой жидкости волновое резонансное число совпадает с числом Маха. Значение этого числа, равное 1, является не только критическим, определяющим переход от дозвукового к сверхзвуковому обтеканию, но также и резонансным в нашем понимании.

Аналогично можно подойти к анализу движения тел на предельном мелководье или обтекания препятствий, расположенных на дне водоёма. Волновой резонансный параметр в этом случае совпадает с числом Фруда по глубине, равенство которого единице характеризует не только критический, но и резонансный режим движения. Однако, критичность здесь иная, чем в околосвуковых течениях. Волновая картина и связанное с ней волновое сопротивление практически исчезают при сверхкритических – нерезонансных скоростях, тогда как при сверхкритических значениях числа Маха волновое сопротивление только появляется.

4. Качественный анализ нелинейных эффектов.

Разработанная автором концепция нелинейных вихревых ударных волн кроме предсказания режимов движения, в которых следует ожидать резонансного взаимодействия тела с внешней средой, позволяет оценить также, в каких случаях и по каким причинам линейная теория может давать результаты, отличные от экспериментальных данных. На её основе можно также предсказать типы структур, которые могут сформироваться в результате резонансного взаимодействия.

Так, например, при анализе результатов расчетов гидродинамических характеристик подводного крыла по линейной теории было получено, что при резонансном значении числа Фруда над задней кромкой крыла должен круто подниматься склон кормовой волны, высота которой по расчетам может быть значительно выше предельной (см. рис 5). Как следует из концепции вихревых ударных волн и теоретических оценок, такая волна неустойчива и на вершине её должна формироваться вихревая ударная волна первого рода - концентрированный вихрь (или каскад пространственных концентрированных вихрей в виде брызг), диаметр которого при относительных глубинах, меньших $\frac{h}{b} = 0.2$, соизмерим с глубиной погружения крыла. Этот вихрь должен поглощать часть свободной границы, которая под действием сил тяжести и поверхностного натяжения теряет устойчивость, что приводит к тому, что при устойчивости в целом глобального вихревого и волнового движения течение внутри формируемой в кормовой части вихревой ударной волны становится нестационарным. Между тем, как следует из анализа формирования вихревых ударных волн на крыле, подъёмная сила

может значительно измениться только тогда, когда сформировавшийся вблизи задней кромки концевой вихрь (вихревая ударная волна первого рода), сходит с поверхности крыла (формирование вихревой ударной волны второго рода).

В резонансном режиме существует взаимное усиление роста циркуляции и роста кормовой волны за крылом. Разрушение кормовой волны на поверхности воды должно приводить к тому, что концентрированные вихри, образующиеся вблизи задней кромки крыла, не смогут отделяться от кромки, и рост циркуляции, а также энергии волны, формирующейся за крылом, прекратится. Таким образом, нелинейность при вихре - волновом резонансе должна приводить к тому, что очень большие величины $\frac{dC_y}{d\alpha}$, полученные на основании линейной теории при малых относительных заглублениях $\frac{h}{b}$ не должны реализовываться. При этом результатом нелинейного взаимодействия может оказаться новая вихревая структура, формирующаяся вблизи задней кромки крыла, включающая в себя как элементы вихревую ударную волну, формирующуюся на свободной поверхности воды в результате разрушения волны, и концевой вихрь, возникающий вблизи задней кромки крыла.

5. Вихре-волновой и структурный резонанс в стратифицированной сплошной среде и вблизи твёрдых границ.

Концепция нелинейных вихревых ударных волн и определенные на её основании условия возникновения структурно-волнового и вихре – волнового и структурного резонанса позволили, не решая задачи, предсказать значения скоростей поступательного горизонтального движения тела, соответствующих резонансному режиму обтекания также и в неоднородной весомай жидкости (или газе).

Для этого необходимо рассчитать дисперсионные соотношения собственных волновых возмущений для стратифицированной жидкости (или газа), с учетом сил тяжести.

Искомое дисперсионное соотношение имеет вид [50]

$$\omega = C_0 k \sqrt{\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{N^2}{C_0^2 k^2}}}$$

где $N(y) = \{[g\rho'_0(y)/\rho_0(y)] + g^2[C_0(y)]^{-2}\}^{1/2}$,

$\rho_0(y)$ - равновесное распределение плотности по высоте, являющееся непрерывно убывающей функцией высоты y .

$C_0(y)$ - скорость звука невозмущенного течения при давлении $p_0(y)$ и распределении плотностей $\rho_0(y)$. ($C_0(y)$ равна отношению приращения давления к приращению плотности при постоянной энтропии); k проекция волнового вектора \bar{k} на горизонтальную ось x . Условием резонанса являются равенства

$$\begin{aligned}\sigma_B &= \sigma_w \\ C_B &= C_w.\end{aligned}$$

При больших значениях C_0 имеют место две сильно отличающиеся друг от друга частоты:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= C_0 k; \\ \sigma_2 &= N\end{aligned}$$

В первом случае скорость волны C_0 и при малых скоростях движения звуковых волн, сопутствующих телу, нет. Резонанс по скорости невозможен. В случае трансзвукового движения, вследствие того, что в линейном приближении все звуковые волны различной длины имеют одну и ту же скорость, функция $\lambda(C_w)$ становится бесконечно-значной и спектр присоединённых волн с одинаковыми амплитудами и различными длинами формирует одну ударную волну, присоединённую к движущемуся телу. Явление вихре-волнового и структурного резонанса должно в этом случае наступать при числах Маха, близких к критическим, и его трудно будет выделить из сложной картины трансзвукового движения. Однако, по-видимому, концепция вихре - волнового и структурного резонанса может помочь в понимании аномалий, возникающих при учете нелинейных эффектов при трансзвуковом обтекании.

Во втором случае условие резонанса приводит к соотношению

$$V_B = \frac{k_1 b_B N}{2\pi}.$$

Из этого условия следует важный вывод: скорость движения тела, соответствующая резонансному обтеканию тела, уменьшается до нуля при $N \rightarrow 0$.

Этот предсказанный теоретически результат может иметь такое же принципиальное значение, как и само явление вихре – волнового и структурного резонанса. В соответствии с ним, с уменьшением степени неоднородности жидкости резонансная скорость перемещения тела стремится к нулю.

Вихре – волновой и структурный резонанс теоретически возможен даже при очень малых неоднородностях сплошной среды и малых скоростях движения тела. Это физическое явление может быть использовано для индикации слабых неоднородностей в сплошной среде и на его основе могут быть сконструированы приборы, обеспечивающие такую индикацию.

С целью проверки этого принципиального теоретического вывода в рамках линейной теории было рассмотрено решение задачи о движении крыла вблизи границы раздела сред различной плотности и выполнены расчеты распределения нагрузки и подъёмной силы крыла при различных значениях $\bar{\rho} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ и относительных глубинах. Для этого случая дисперсионное соотношение определяется формулой

$$\sigma = \frac{1 - \bar{\rho}}{1 + \bar{\rho}} k^2;$$

а критическое число Фруда лежит приближённо в диапазоне

$$Fr_{cr} = Fr_{cr\bar{\rho}} \sqrt{\frac{1 - \bar{\rho}}{1 + \bar{\rho}}}, \text{ где } 0.4 < Fr_b < 0.565.$$

Последнее соотношение характеризует ту же тенденцию – уменьшение резонансного числа Фруда с уменьшением степени неоднородности среды, в которой движется крыло.

Результаты расчётов, выполненных автором совместно с Ю.В. Кафтанниковым [89], полностью подтвердили предсказание о перемещении резонансного значения числа Фруда, соответствующего вихре - волновому резонансу, к нулю при уменьшении степени неоднородности сплошной среды ($\bar{\rho} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \rightarrow 1$).

Кроме того, результаты расчетов показывают, что уменьшение неоднородности мало изменяет воздействие крыла на амплитудные характеристики гравитационных волн, возникающих в среде, то есть относительная интенсивность резонансного воздействия падает незначительно. Нелинейные эффекты, связанные с формированием

новых вихревых структур, должны сохраняться вплоть до чрезвычайно малых неоднородностей и чисел Фруда.

Возникновением режима вихре - волнового и структурного резонанса может быть объяснено также резкое увеличение подъёмной силы крыла при приближении к твёрдой поверхности [18], широко использованное при создании современных транспортных средств. Резонансный характер этого режима может быть объяснён следующим образом. Влияние экрана на подъёмную силу крыла теоретически может быть заменено эквивалентным влиянием симметрично расположенного относительно экрана крылом.

При таком рассмотрении указанного течения мы находим объекты вихре – волнового и структурного резонанса – это два крыла, движущиеся с одной скоростью и имеющие одинаковые хорды, расположенные симметрично друг относительно друга. Если эти крылья рассматривать как две уединённые волны, то существуют все необходимые условия для вихре – волнового и структурного резонанса. Именно вихре - волновым и структурным резонансом может быть теперь объяснено резкое увеличение подъёмной силы крыла при приближении к твёрдой поверхности [18].

Этот резонансный эффект может быть использован для разработки новых методов распознавания образов.

Кроме того, возникает идея о том, что в самом общем случае процесс распознавания образов, то есть отбора среди многих возможных таких, которые соответствуют данному, может быть построен на принципе структурно- волнового или вихре - волнового и структурного резонанса.

Более сложные резонансные явления происходят при обтекании несущих систем в жидкости малой глубины. Наряду с резонансными взаимодействиями с волнами на свободной поверхности крыло резонансно взаимодействует с дном. Этот двойной или даже тройной резонанс, может привести к мощнейшей концентрации энергии и его использование позволит построить новые конструкции, например, возбуждающие и гасящие энергию волн, в том числе и волн цунами. Некоторые теоретические результаты, частично подтверждающие необычность и резонансный характер этого режима движения приведены в монографии [55].

. В последние годы автором совместно с Н.В. Корневым был разработан новый вихревой метод решения трехмерных уравнений Навье - Стокса, использование которого, по-видимому, позволит

прояснить в будущем расчетным методом детали вихре-волновых резонансных явлений [56]-[67].

6. Теоретический анализ кавитации подводных крыльев в режиме вихре - волнового и структурного резонанса.

Существует еще одно направление в механике сплошной среды, в котором с успехом была применена концепция вихревых ударных волн и наблюдался вихре - волновой и структурный резонанс. Это - исследование кавитационного обтекания крыла и, в частности, анализ режима, названного автором «переходным режимом кавитационного обтекания», который без использования указанной концепции не поддавался полному теоретическому объяснению.

Исследования кавитационных течений при движении тел в жидкости, выполненные рядом авторов [91-99], позволили теоретически решить в рамках стационарной теории струй невязкой жидкости большое количество проблем, связанных с этим разделом гидродинамики. В работах А.Н. Иванова [91-92], М. П. Тулина [93, 94], Дж. Гюрста [95], Р. Вейда [96], А.Г. Терентьева [97], М. А. Басина [18, 74, 99], И.Т. Егорова [74], М.А. Баевой и Л.П. Зилиста [18,], А. В. Шалларя [98, 99], Б.В. Косова [98] и других исследователей показано теоретически, что при кавитационном обтекании крыла в режиме, когда длина каверны оказывается близкой к хорде как нелинейная теория струй идеальной жидкости, так и квазилинейная теория, предсказывают аномальные параметры формы каверны и сил, действующих на крыло.

Экспериментальные исследования колебаний каверны, выполнявшиеся Кнэппом [100], а также В.П. Ильиным и Ю. Л. Левковским [101, 102] и другими исследователями показали, что при приближении длины каверны к длине хорды крыла амплитуда этих колебаний интенсивно растет и частота их уменьшается. Силовые измерения в этом режиме кавитации проводились различными авторами: О. Вальхнером [103], Нумахи [104], А.Н. Ивановым [105], М.Мейером [106] а также И. Т. Егоровым, М. А. Басиным, Ю.М. Садовниковым, А. В. Шалларем, Б. В. Косовым, Е.Б. Ануфриевым и другими авторами [107-109], [18].

Они показали, что в этом режиме, во первых, происходит резкое увеличение сил, действующих на крыло, и толщины формирующейся

каверны, а во- вторых, развиваются интенсивные колебания каверны и циркуляции скорости вокруг крыла. Однако, в этих работах не указывалось на резонансный характер этого режима обтекания и не была дана физическая схема, описывающая причину резонанса и позволяющая описать нелинейные вихревые структуры, формирующиеся при возникновении этого режима. Отметим, что так же, как и в случае движения крыла вблизи свободной поверхности несжимаемой жидкости, решение квазилинейной задачи здесь может быть представлено в виде системы линейных интегральных уравнений относительно двух функций-вихревой интенсивности, распределенной по поверхности крыла и каверны, и распределения источников, интенсивность которых характеризует распределение толщин профиля и каверны.

Как и в случае крыла, движущегося вблизи свободной поверхности воды, эта система имеет бесконечное множество сингулярных решений для распределения источников и вихрей, при выборе одного из которых используется два дополнительных условия: условие Жуковского- Чаплыгина-Кутта для вихрей и условие замыкания - для каверны. Именно эти два условия определяют нелинейную взаимную связь между обеими искомыми функциями, одна из которых характеризует относительную толщину каверны, а другая - распределение циркуляции по крылу и его подъемную силу. Из анализа аналитического и численного решения этой задачи следует, что, когда длина каверны приближается к хорде крыла, происходит утолщение каверны, приводящее к увеличению погрешности средней линии системы профиль-каверна, что, в свою очередь, увеличивает циркуляцию вокруг этой системы и вновь утолщает каверну. Если рассмотреть теоретическое решение стационарной линейной задачи в случае, когда длина каверны в точности равна хорде крыла, то взаимное усиление приводит в линейной постановке задачи при заданном малом угле атаки к неограниченному росту толщины каверны и коэффициента подъемной силы крыла. Решение соответствующей нелинейной задачи, хотя и не дает бесконечных величин толщины каверны и коэффициента подъемной силы, но указывает на существенный рост обоих указанных параметров.

Удивительным является тот факт, что даже при нулевом угле атаки пластины теоретически существует такое резонансное нелинейное циркуляционное течение, когда около пластинки возникает присоединённая каверна, плавно замыкающаяся на задней

кромке крыла. Подробный теоретический анализ такого течения выполнен М.А. Басиным и А.В. Баландиным [89].

Этот результат указывает на то, что форма профилей, наиболее устойчивых против кавитации, обобщённая диаграмма которых построена автором в [18] может рассматриваться как практическая реализация модели резонансного кавитационного течения. Вихреволновой и структурный резонанс, оказывается был уже давно в скрытом использован при проектировании профилей крыльев, устойчивых против кавитации.

Таким образом, анализ квазилинейной задачи, так же как и для крыла, движущегося вблизи границы раздела сред, указывает в случае переходного режима кавитации на те же признаки, которые были обнаружены ранее в случае крыла, движущегося вблизи свободной границы.

Для того, чтобы применить к рассматриваемому случаю качественный анализ, основанный на теории вихревых ударных волн, рассмотрим с волновой точки зрения паровую или воздушную каверну, присоединённую к движущемуся телу. Формирующаяся около тела присоединённая каверна, заполненная газом или паром, с деформируемой границей раздела плотности и фаз с позиций разработанной классификации нелинейных волновых движений, вихревых и грибовидных структур и транспортно-информационных систем, так же, как и твердое тело, может рассматриваться как поступательно движущаяся уединённая волна, скорость которой равна скорости тела (тем самым первое условие вихре - волнового и структурного резонанса для присоединённых каверн уже выполнено), а длина которой однозначно связана с длиной каверны:

$$\lambda_{cav} = m_{cav} b_{cav}.$$

При этом с достаточной степенью достоверности (вследствие аналогичной топологии) можно считать, что коэффициент m_b для движущегося в жидкости тела и m_{cav} для формирующейся около него каверны равны между собой.

$$m_b = m_{cav}$$

Поэтому в данном случае необходимое условие возникновения вихреволнового и структурного резонанса, имеющее в общем случае вид,

$$\lambda_b = \lambda_{cav}$$

значительно упрощается и принимает форму

$$b_b = l_{cav},$$

что полностью соответствует условию резкого роста амплитуд обеих введенных нами в рассмотрение нелинейных волн, полученному при решении квазилинейной задачи. Источники определяют толщину каверны, т.е. амплитуду нелинейной волны, ей соответствующей, а циркуляция, в соответствии с концепцией вихревых ударных волн первого и второго рода, определяют амплитуду присоединенной к телу циркуляционной волны, являющейся головной частью формирующейся при движении крыла грибовидной структуры.

Концепция вихревых ударных волн позволяет, как и в случае движения крыла в неоднородной сплошной среде, не только предсказать условия возникновения вихре - волнового и структурного резонанса, но и построить схематизированную картину нелинейного вихре - волнового и структурного взаимодействия, указать на отличие реальной картины течения от предсказанных по квазистационарной теории и качественно проанализировать новые структуры, которые получаются в результате резонансного взаимодействия.

Резонанс должен приводить не только к увеличению амплитуд обеих взаимодействующих волн: каверны и циркуляционной волны около крыла,- но и к совместной глобальной потере ими устойчивости, в результате которой формируются периодически возникающие грибовидные структуры, создающие за кавитирующим крылом кармановскую дорожку, основные параметры которой определяются размерным резонансным параметром- хордой крыла (возникают автоколебания каверны и нелинейные автоволны в виде сложной системы, головную часть которой представляют резонансно взаимодействующие крыло и каверна, движущиеся со скоростью движения тела, а хвостовую- кармановская дорожка связанных грибовидных структур, формирующихся из пограничного слоя на поверхности крыла и свободной границы каверны).

Если проанализировать качественно картину развитой кавитации за телом (двумерное течение), то аналогично случаю отрывного обтекания можно выделить три основных типа нелинейных волновых структур: расположенное впереди движущееся поступательно со скоростью V_0 твердое тело, присоединенную к нему деформируемую, заполненную газом или паром каверну и след, который можно схематизировать кармановской дорожкой связанных грибовидных структур.

Границы каверны, которые могут считаться также поверхностями скачка завихренности, принципиально не могут формировать установившегося течения, так как в этом случае в хвостовой части

должна была бы существовать седловая точка, а жидкость вливалась бы внутрь полости, пока не заполнила бы её .

В действительности, тенденция к возвратному течению жидкости внутрь каверны в хвостовой её части существует. Благодаря ей внутри каверны формируются области завихренности в паровой (газовой) фазе. Сама граница каверны окаймляет область, занятую завихрённой сплошной средой. Однако, стационарная картина течения неустойчива, и периодически происходит формирование вихревых структур, в результате чего в следе за телом периодически формируются связанные свободные грибовидные структуры - кармановская дорожка свободных вихрей.

Собственная скорость перемещения структур кармановской дорожки отлична от скорости перемещения тела и каверны .Кроме указанных выше трех типов вихре - волновых структур существует переходная зона, в которой происходит периодическое формирование грибовидных структур кармановской дорожки.

При увеличении длины каверны, благодаря большему влиянию пространственности течения и поперечной неустойчивости крупные вихревые структуры становятся менее интенсивными. Переходная зона занимает все меньшую относительную часть каверны и, находясь вдали от тела, оказывает все меньшее влияние на колебание его гидродинамических характеристик. Структура и основные размеры формирующейся кармановской дорожки определяется в случае развитой кавитации поперечным размером каверны в хвостовой ее части, а точнее говоря, связанной с этим размером амплитудой изменения длины каверны за время формирования очередного периода кармановской дорожки. Именно этот параметр, в соответствии с концепцией вихревых ударных волн, определяет временные и пространственные масштабы формирующихся грибовидных структур, топологическая картина которых одинакова как при обтекании плохообтекаемых тел, так и при обтекании тел с развитыми кавернами. Именно этим объясняется близкое к постоянному значение числа Струхала формирования кармановской дорожки, построенного по характерному размеру тела или каверны, которые её формируют.

В случае развитой кавитации наклон пластины (или другого) тела лишь изменяет относительную толщину каверны и увеличивает частоту формирования кармановской дорожки. При малых углах атаки толщина каверны при постоянной длине практически линейно зависит от угла атаки, а следовательно линейно от этого параметра зависит и период формирования кармановской дорожки .

Несколько иную картину можно представить при качественном анализе с позиции концепции вихревых ударных волн частичной кавитации на тонком профиле крыла, поставленном под малым углом атаки.

При больших значениях числа кавитации и малых углах атаки в кормовой части профиля сечения крыла формируется вихревая ударная волна второго рода с разгонным вихрем, вихревой пеленой и образующейся на крыле циркуляцией, величина которой определяется с помощью введения гипотезы Чаплыгина- Жуковского.

Вблизи носовой кромки профиля также образуется присоединенная вихревая ударная волна первого рода - концентрированный вихревой пузырь, размеры которого обычно невелики по сравнению с размерами крыла. Существуют такие углы атаки и числа Рейнольдса, когда вихревой пузырь, благодаря влиянию вязкой диффузии и структуры потенциального внешнего потока оказывается практически стационарным.

Именно такая модель теоретического расчета ламинарных и турбулентных пузырей заложена в расчетных схемах, используемых в настоящее время различными авторами. [107-111].

В зоне существования малых вихревых пузырей, расположенных обычно вблизи передней кромки крыла, и формируются частичные присоединенные каверны. Именно эта гипотеза положена Э.Л. Амроминым и А.Н. Ивановым [105] в основу предложенной ими теоретической модели формирования присоединенных каверн при исследовании масштабного эффекта возникновения кавитации, которая в настоящее время интенсивно развивается Э.Л. Амроминым. Кавитационный пузырь, так же, как и формирующий его вихревой пузырь, первоначально является стационарным, и его возникновение сначала практически не сказывается на суммарных гидродинамических характеристиках крыла. Уменьшение числа кавитации приводит к росту размеров каверны. Наконец, наступает такой момент, когда сил поверхностного натяжения и вязкостных сил уже недостаточно для преодоления тенденции к возникновению неустойчивости в хвостовой части каверны. В этом районе начинает формироваться возвратное течение, которое образует периодически отделяющиеся от основной каверны полые вихревые пузыри - каверны и образующиеся в пограничном слое вихревые пузыри противоположного знака, интенсивность которых благодаря влиянию трения оказывается ниже, чем интенсивность сходящих сверху полых вихревых пузырей. Это несоответствие циркуляций полых и пристенных вихревых структур

компенсируется изменением циркуляции крыла в целом, что, в свою очередь, приводит к периодическому формированию концевых вихрей вблизи задней кромки крыла. Таким образом, с крыла в режиме частичной кавитации также сходит кармановская дорожка вихревых (грибовидных) структур, причем верхний ряд представляет собой след от колеблющейся каверны, а нижний - ряд вихрей, сходящих с задней кромки крыла. Основное отличие этой кармановской дорожки от той, которая возникает из развитой каверны, заключается в том, что нижние вихревые структуры сходят одновременно не с теми вихревыми структурами, которые вызвали их появление, а сдвинуты по отношению к ним в пространстве. Между верхними и нижними вихрями до схода с крыла отсутствует непосредственное взаимодействие. Кармановская дорожка как бы расщеплена в пространстве и во времени (её верхние и нижние структуры не взаимодействуют между собой).

Как показывают теоретические расчеты, начиная с относительной длины каверны $\frac{l_{cav}}{b} = 0.7 - 0.8$, возникает резонансное взаимодействие параметров каверны с циркуляционным течением вокруг крыла, которое теоретически проявляется в неограниченном росте относительной толщины каверны и циркуляции крыла. Исходя из концепции вихревых ударных волн, можно также предсказать, что одновременно с ростом амплитуды стационарных волн: толщины волны - каверны и циркуляционной волны около движущегося тела, - должен наблюдаться нелинейный вихре - волновой резонанс между вихревыми ударными волнами, формируемыми каверной и крылом, на котором возникает периодически изменяющаяся подъемная сила. При этом, если при малых длинах каверны возникала несинхронизированная кармановская дорожка вихрей, параметры которой зависят от ширины каверны, то в резонансном случае должна формироваться единая резонансная кармановская дорожка, основные размеры которой при $\frac{l_{cav}}{b} \approx 1$ определяются хордой крыла.

Колебания каверны в этом режиме должны быть максимальными и равными длине каверны.

7. Результаты экспериментального исследования проявлений вихре - волнового и структурного резонанса.

Результаты экспериментальных исследований, в которых были изучены две из возможных форм вихре-волнового резонанса, сводятся к следующему.

1. Теоретически было предсказано, что при относительных скоростях движения крыла, лежащих в диапазоне чисел Фруда $0.4 < Fr_b < 0.565$ для $h/b > 0.3$ и при $Fr_h \approx 1$ ($h/b < 0.1$) должны возникать интенсивные резонансные явления. Анализ этих явлений, выполненный с позиций квазилинейной теории и концепции вихревых ударных волн показал, что при резонансных значениях чисел Фруда вблизи крыла возможно появление разрушающихся волн и формирование новых вихре-волновых структур. В опытовых бассейнах были проведены испытания крыльевого устройства прямоугольной формы в плане с удлинением $\lambda = L/b = 3$ (L - размах крыла) с плоско-выпуклым сегментным профилем продольного сечения (относительная толщина $\bar{c} = c/b = 0.06$) в широком диапазоне относительных глубин погружения и чисел Фруда. Испытания проводились при углах атаки $-2 < \alpha < 8$. Особое внимание уделялось измерению гидродинамических характеристик и визуализации картины течения в критическом диапазоне чисел Фруда и относительных глубин погружения. Как и было предсказано теоретически, получены значительные отрицательные значения подъемной силы крыла даже при положительных геометрических углах атаки. При $\alpha = 0^\circ$ и $h/b = 0.2$ наблюдаются значения $C_y = -0.4$. Как это и предсказано на основании концепции вихревых ударных волн, экспериментальные данные для $dC_y/d\alpha$ по сравнению с резонансными значениями, полученными по линейной теории, наоборот, сильно разошлись: они оказались значительно меньше расчетных. Кроме того, анализ выполненных фотографий подтвердил теоретические выводы о формировании в указанном диапазоне чисел Фруда и относительных глубин погружения при всех исследованных углах атаки над задней кромкой крыла разрушающейся волны с вихревым насадком. При малых углах атаки экспериментально обнаружена носовая разрушающаяся волна иной формы, имеющая плоскую вершину, покрытую нестационарными "бурунами". Носовая волна уменьшается с увеличением угла атаки, и при $\alpha = 8^\circ$ практически исчезает: тенденция к исчезновению носовой волны с увеличением угла атаки подтверждается результатами расчетов по линейной теории. Вне

указанного резонансного диапазона чисел Фруда при $Fr_b > 0.565$, как и предсказано расчетами, происходит качественное изменение картины течения. Вершина кормовой волны смещается назад и практически сразу исчезает носовая волна. С удалением от крыла присоединенной носовой и кормовой волн резко увеличивается значение C_y . Величина коэффициента подъемной силы проходит через нуль и с дальнейшим увеличением скорости принимает положительные значения (если $\alpha > 0$). Течение вблизи крыла становится плавным с малыми волновыми деформациями на поверхности жидкости. При этом измеренные величины подъемной силы крыла практически совпадают с данными, полученными по линейной теории. Анализ экспериментальных данных показал, что вне зоны вихре-волнового резонанса предсказания линейной теории хорошо согласуются с экспериментальными данными. Предсказания о расхождении значений $dC_y / d\alpha$ между результатами линейной теории и экспериментом, основанные на концепции вихревых ударных волн первого и второго рода, качественно подтвердились. Эксперимент показал также существование новой, не изучавшейся ранее формы разрушения нелинейной носовой волны. Диапазон чисел Фруда и относительных погружений, соответствующий возникновению аномальных гидродинамических явлений в эксперименте практически полностью совпал с теоретически предсказанным диапазоном, что еще раз подтвердило основные положения на которых строился теоретический анализ.

2. Подробные экспериментальные исследования переходного режима кавитационного обтекания крыла выполнялись начиная с середины 60-х годов. В ходе проведенной серии экспериментов на гидродинамических стендах и в кавитационных трубах измерялись мгновенные параметры течения около кавитирующего крыла. Исследовались зависимости от времени следующих относительных параметров течения: мгновенной длины присоединенной каверны l_{cav} , ее ширины b_{cav} , протяженности зоны, в которой формируется вихревая ударная волна первого рода (длины обратной струйки), параметры структуры концентрированных вихревых объемов за движущимся крылом, являющихся результатом формирования вихревых ударных волн второго рода, образующихся в результате самопересечения границ каверны и вихревого насадка вблизи задней кромки крыла. Картина обтекания фиксировалась с помощью скоростной киносъемки (1000 - 2000 кадров в секунду).

Одновременно с визуализацией структуры течения измерялись мгновенные и средние значения подъемной силы и сопротивления крыла. Эксперименты проводились с крыльями различных профилей ($\bar{c} \leq 0.09, \bar{c} = \frac{c}{b}$, где c - максимальная толщина профиля, b - хорда крыла) в диапазоне чисел кавитации $\kappa = \frac{p_0 - p_{cav}}{\rho V^2 / 2}$, (где p_0 - давление в потоке перед крылом, p_{cav} - давление в каверне.) $0.2 \leq \kappa \leq 1.6$ и углов атаки $-4^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$, при этом главное внимание уделялось исследованию присоединенных каверн, начинающихся в районе носовой кромки крыла.

. Анализ полученных кинограмм позволил четко выделить резонансный "переходный режим кавитационного обтекания крыла. Как показали результаты киносъемки, в этом режиме подтверждаются предсказания качественной модели, полученной на основании концепции вихревых ударных волн. Действительно, переходный режим обладает специфическими, свойственными только ему и универсальными для него параметрами, определяемыми нелинейным резонансным взаимодействием циркуляционного обтекания крыла с образованием вихревых ударных волн вблизи задней кромки и течения с формированием вихревых ударных волн на границах присоединенной каверны. Частота колебаний размеров каверны и суммарных сил, действующих на крыло, когда максимальная длина каверны близка к хорде крыла, а следовательно, близки и их волновые частоты, определяется тем условием, что число Струхала $Sh = \frac{nb}{V_0} \approx 0.18 - 0.20$,

где n - частота колебаний. При этом амплитуда колебаний каверны приблизительно равна её длине и определяется резонансным параметром - хордой крыла. Основные параметры вихре - волновых структур в этом режиме кавитационного обтекания практически не зависят ни от формы профиля крыла, ни от его угла атаки, ни от числа кавитации.

Результаты экспериментов подтвердили предсказания, основанные на концепции вихревых ударных волн, о том, что картина течения в резонансном переходном режиме является результатом нелинейного резонансного взаимодействия кавитационного и циркуляционного обтекания крыла, которое приводит не только к взаимному увеличению толщины каверны и циркуляции на крыле, но и к

синхронизации следа : формированию единой резонансной вихревой дорожки периодически образующихся вихревых ударных волн второго рода , верхний ряд которой является результатом формирования вихрей, отделившихся от границы каверны, а нижний ряд - следствием образования аналогичных вихревых сгустков в зоне вблизи задней кромки крыла. Соединяющая их вихревая пелена формируется как комплексная двойная граница раздела , частицы одной части которой ранее принадлежали границе каверны . а другой - пограничному слою на крыле.

8. Обобщённая концепция вихре - волнового и структурного резонанса.

Анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов показывает, что нелинейное вихре - волновое резонансное взаимодействие циркуляционного вихревого течения около движущихся в неоднородной сплошной среде тел с волновыми движениями этой среды может приводить к появлению новых структур, представляющих собой взаимодействующие между собой нелинейные вихревые ударные волны и грибовидные структуры. Критерием для предсказания указанных аномальных явлений должны являться совпадение или краткость длин, скоростей или частот нелинейных периодических или одиночных волн, образующихся и взаимодействующих между собой.

Концепция вихре - волнового и структурного резонанса может иметь далеко идущие теоретические обобщения, применение которых к различным частным случаям позволит предсказать и объяснить многие необычные явления, возникающие при взаимодействии структур и систем различной природы.

Приведённые выше примеры резонансного взаимодействия свидетельствуют о возможности существования вихре -волновых и структурных резонансов при взаимодействии произвольных близко расположенных структур, находящихся в некотором общем поле, через которое они могут воздействовать друг на друга. Если структуры длительное время находятся вблизи друг друга, независимо от их перемещения относительно поля, то первое условие структурно-волнового резонанса – приближённое равенство скоростей нелинейных волновых структур, выполняется автоматически.

Вторым необходимым условием структурного резонанса является равенство эквивалентных длин волновых структур. Это условие выполняется, когда соответствующие размеры взаимодействующих через поле структур близки.

Для проверки возможности существования и форм проявления структурно-волнового резонанса достаточно знать основные параметры поля, в котором расположены взаимодействующие структуры, основное уравнение, описывающее динамику поля, найти собственный спектр линейных и нелинейных волн, характеризующих это поле. Для большинства известных полей, особенно полей, описываемых линейными операторами, эта задача в той или иной степени решена (частные случаи таких решений рассмотрены нами выше). Для простейшего одномерного случая, когда поле удовлетворяет линейному уравнению в частных производных, эта задача решается в общем случае. Для более общих случаев в математике и физике разработана теория линейных и нелинейных операторов [112].

Воздействие структур на поле обычно описывается некоторыми интегральными операторами, характеризующими изменение поля под действием движущихся и излучающих структур. При этом не все параметры структур, воздействующие на поле, должны быть закреплены. В этом случае обратное действие поля на ту же самую или другую структуру может резонансно увеличивать (или уменьшать) не закреплённые параметры структуры. Условия резонанса остаются теми же. Совпадение длин и частот обобщённых волн и геометрическая близость структур между собой в течение некоторого промежутка времени..

В каждом частном случае может быть построено приближённое математическое описание взаимодействия и определены условия возникновения вихре - волнового и структурного резонанса при взаимодействии структуры и поля, а также при взаимодействии нескольких структур через поле.

Как следует из выполненного анализа некоторых проявлений вихре-волнового и структурного резонанса, резонансное взаимодействие приводит к отбору и усилению тех волновых частот и длин волн и структур, которые являются близкими для резонансно взаимодействующих объектов. Отсюда следует, что может оказаться справедливым не только утверждение о том, что вихре - волновой и структурный резонанс может быть использован для распознавания образов или обнаружения слабых неоднородностей в сплошных средах и полях различной природы, но также утверждение о том, что если

такой отбор и такое усиление в каких-либо явлениях наблюдается, то сам этот факт может в ряде случаев служить сигналом, проявляющим вихре -волновой и структурный резонанс. При этом целесообразно искать не только резонансно взаимодействующие объекты, но и их резонансные параметры. Такой подход позволит строить качественные теоретические модели новых аномальных явлений.

Остановимся теперь на том, как может проявляться вихре - волновой и структурный резонанс в сложных транспортно - информационных системах, часто представляющих собой иерархию волновых процессов с различными частотами и структур с различными масштабами, взаимодействующими между собой. Это внутреннее взаимодействие также осуществляется чаще всего резонансным образом, за счёт связей соседних уровней иерархии и комбинационных резонансов, позволяющих перейти от заданных частот возмущения и масштабов (волновых чисел) к частотам и масштабам, определяемым соотношениями

$$\begin{aligned} n\omega &= n_1\omega_1 + n_2\omega_2 \\ m\kappa &= m_1\kappa_1 + m_2\kappa_2 \end{aligned} \quad [113].$$

Возникновение вихре- волнового и структурного резонанса на одном уровне иерархии может резонансно же передаваться на нижележащие и вышележащие уровни системы. Вызванные резонансным воздействием возмущения могут нарастать и переводить систему в новое состояние (фазовый переход) или разрушить систему.

Заключение.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили не только предсказывать диапазон физических параметров, при которых возможно явление вихре - волнового и структурного резонанса, и качественно описывать процессы формирования новых структур, но и значительно расширить сферу поиска возможных проявлений этого явления.

Вихре - волновой и структурный резонанс может проявиться и иметь свои специфические формы при любых перемещениях произвольных тел в неоднородной сплошной среде, что дает возможность применять основные теоретические положения, позволяющие изучать это и другие нелинейные явления к судостроению и авиации, техническим производствам, химии,

биологии, океанологии и метеорологии, физике и магнитной гидродинамике

Предсказанное теоретически и обнаруженное экспериментально явление вихре-волнового и структурного резонанса вносит коренные изменения в существующие представления о поведении течений около тел, движущихся в неоднородной сплошной среде. Знание его природы и основных критериев возникновения позволяет теоретически предсказать, экспериментально обнаружить и объяснить не исследованные ранее аномальные режимы при движении тел в жидкости, газе и других сплошных средах.

Открытие этого явления стимулирует создание и развитие новых методов теоретических и экспериментальных исследований вихревых движений в различных областях науки и техники.

Концепция вихревых ударных волн первого и второго рода, а также осуществлённое в связи с изучением открытого явления отождествление поля скоростей около движущегося тела и присоединенных следов и каверн со специфическими уединенными нелинейными волнами используется для классификации нелинейных волновых движений и объяснения известных, но не изученных до конца нелинейных явлений, связанных с движением тел в жидкости: отрывное обтекание тел [78], возникновение и развитие циркуляционного течения около тела [41], возникновение и развитие разрушающихся ударных волн на свободной поверхности [53], обтекание интерцепторов [79], исследование прорыва воздуха к телам и крыльям [77], гидроупругие колебания кавитирующих и некавитирующих крыльев [75].

Обнаруженное явление вихре-волнового и структурного резонанса может найти аналогии не только в гидродинамике тел, движущихся в неоднородной жидкости и газе, но и во всех тех случаях, когда какая-либо жесткая или деформируемая система перемещается в неоднородной среде. Такие явления могут наблюдаться в метрологии, океанологии, астрофизике, физике плазмы, химии, биологии, различных технологических процессах.

Разработанная теория и выдвинутая концепция позволяют предсказывать условия, при которых следует искать аналогичные явления.

Особого внимания заслуживает тот обнаруженный при изучении обтекания несущих тел теоретический результат, что при уменьшении степени неоднородности среды резонансные явления, почти не затухая, перемещаются в зону очень малых скоростей относительного движения

тела и сплошной среды. Это позволяет использовать открытое явление как эффективный индикатор малых неоднородностей в среде и устройство управления, так как в этом случае при резонансе значительный эффект может быть достигнут без существенных затрат энергии.

Значение полученных результатов состоит не только в обнаружении и изучении нового неизвестного ранее класса резонансных процессов и вихре-волновых структур, но также и в том, что разработанная концепция вихревых ударных волн и классификация волновых движений и вихревых, грибовидных и древовидных структур позволяет предсказывать и обнаруживать неизвестные ранее формы вихре - волнового взаимодействия, создавать искусственно условия для возникновения этого явления применительно к практическим задачам, а также создавать новые способы и разрабатывать новые конструкции , часть из которых используется в настоящее время в судостроении [74, 79, 89, 98, 99, 114-116], которые могут найти применение также в других областях техники и научных исследований.

Широкое поле деятельности открывается также для изучения физических явлений и вихре-волновых структур , которые могут сформироваться при взаимодействии резонансного потока с другими типами волновых и колебательных движений колебания крыла, качке судна . вибрации, излучения и т.д.

Значение полученных результатов состоит не только в обнаружении и изучении нового неизвестного ранее класса резонансных процессов и вихре-волновых структур, но также и в том , что разработанная концепция и классификация волновых и вихревых движений позволяет предсказывать и обнаруживать неизвестные ранее формы вихре-волнового взаимодействия , создавать искусственно условия для возникновения этих явлений и разрабатывать способы их предотвращения применительно к практическим задачам, а также создавать новые способы и разрабатывать новые конструкции, которые могут найти применение также в различных областях техники и научных исследований.

Широкое поле деятельности открывается также для изучения физических явлений и вихре-волновых структур , которые могут сформироваться при взаимодействии резонансного потока с другими типами волновых и колебательных движений.

В последнее время предприняты попытки обнаружения подобных явлений в биологии и науках о человеке.[85, 87]

В настоящее время разрабатываются математические модели, позволяющие определить общие условия возникновения волнового вихревого и структурного резонанса. Их анализ позволил создать классификацию вихре - волновых и структурных резонансов при взаимодействии тел и неоднородных сред, включающую:

1. резонансное возбуждение поступательно движущимся телом определённой волновой картины, одной из возможного спектра волн в сплошной среде;
2. резонансное возбуждение волн колеблющимся телом или вихревой структурой;
3. двойной резонанс, по скорости и размерам, связанный с движением несимметричного тела в среде, в которой возможно появление диспергирующих волн и вихревых структур;
4. резонансное взаимодействие нескольких несимметричных тел, движущихся в сплошной среде (структурно-волновой резонанс).

Два первых типа явлений были известны ранее и были исследованы в частных случаях. Но общие условия их возникновения не были найдены. Не был ясен и резонансный характер таких взаимодействий.

Третий и четвёртый типы вихре - волнового и структурного резонанса либо не изучались вовсе, либо не рассматривались ранее как резонансные явления.

Автор высказал гипотезу о том, что подобные явления должны быть широко распространены в биологических и социальных процессах. В частности, вихре - волновой и структурный резонансы могли играть существенную роль в возникновении жизни. Эта гипотеза требует детальной теоретической проработки и может явиться основанием для создания нового направления в изучении этой важнейшей научной проблемы.

Литература .

1. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости . М.: Наука. 1977, 811с.
2. Филиппс О.М. Взаимодействие волн - эволюция идеи. В монографии: "Современная гидродинамика , успехи и проблемы . Редакторы Дж.Бетчелор, Г. Моффат М.: Мир.1984.С. 297-314.

3. Michell J. H. The Wave Resistance of a Ship. Philosophical Magazine Ser 5, 1898, Vol. 45. № 272.
4. Havelock T.H. The Resistance of a Ship among Waves -PRSL. Ser. A 1937. Vol. 161. № 906.
5. Кочин Н.Е. О волновом сопротивлении и подъемной силе погруженных в жидкость тел. Труды конференции по теории волнового сопротивления. М.: Изд. ЦАГИ. 1937.С.1-30.
6. Костюков А. А. Теория корабельных волн и волнового сопротивления. Л.: Судпромгиз. 1959.
7. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна. Л.: “Речной транспорт”. 1961.
8. Справочник по теории корабля. В трех томах. Под редакцией Я. И. Войткунского. Л.: «Судостроение» 1985.
9. Келдыш М.В., Лаврентьев М. А. О движении крыла под поверхностью тяжелой жидкости – Труды конференции по теории волнового сопротивления 1987М.: Изд. ЦАГИ С. 31-32
- 10.Седов Л.И. Плоская задача о глиссировании по поверхности тяжелой жидкости. Труды конференции по теории волнового сопротивления 1987М.: Изд. ЦАГИ С. 7-30.
11. Владимиров А. Н. Подъемная сила подводного крыла вблизи свободной поверхности. Л.: “Судостроение“. №6. 1937.
- 12.Чудинов С. Н. О подъемной силе подводного крыла конечного размаха. Труды ВНИТОСС. 1965. Т.6. Вып. 2 . Сс. 74-92.
- 13.Блюмин В. И., Иванов Л. А., Масеев М. Б. Транспортные суда на подводных крыльях. М.: Транспорт. 1964.
14. Егоров И. Т., Соколов В.Т. Гидродинамика быстроходных судов. Л.:”Судостроение”1971, 424с.
15. Эпштейн Л. А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов . Л.”Судостроение”. 1970
16. Федоров Е. А. Плоская задача о движении тела произвольной формы под свободной поверхностью идеальной невесомой жидкости. Труды НТО СП. 1968 . Вып. 104. С. 126-133.
17. Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами Киев.: “Наукова думка”. 1969. 216 с.
18. Басин М. А. Шадрин В. П. Гидро- аэродинамика крыла вблизи границы раздела сред . Л.: Судостроение. 1980. 304с.
19. Панченков А.Н. Исследование движения подводного крыла вблизи свободной поверхности жидкости. Автореферат диссертации. Киев 1962

20. Nishiyama T. Lifting line theory of the submerged hydrofoil of finite span”, Parts 1,2,3. Journal of the American Society of Naval Engineers. 1959-1960. Vol. 71-72
21. Isai W.H. Zur Theorie der nahe der Wasseroberfläche fahrenden Tragflacher . Ing Arch 27(1959/60) S.295
22. Панченков А. Н. Гидродинамика подводного крыла. Киев.: «Наукова думка» 1965. 552 с.
23. Salvesen N.(1981) “Five Years of Numerical Naval Ship Hydrodynamics at DINSFDC” // J. Of Ship Research. Vol.25. № 4 Pp. 219-235
24. Басин М.А. О силах, действующих на крыло, движущееся вблизи свободной поверхности весомой жидкости. Доклад на конференции: “ Гидродинамика крыла , движущегося вблизи свободной поверхности жидкости , и глиссирующих поверхностей». Л.:1982.
25. Ткач А. Я. О влиянии весомости среды на гидродинамические характеристики несущей поверхности . Доклад на конференции: ”Гидродинамика подводного крыла . движущегося вблизи свободной поверхности жидкости и глиссирующих поверхностей.“ Л.: 1982.
26. Макаеев М. А. К решению плоской задачи обтекания тонкого гибкого профиля под поверхностью тяжелой жидкости . Доклад на конференции Гидродинамика подводного крыла . движущегося вблизи свободной поверхности жидкости и глиссирующих поверхностей.“1982. Л.:.
27. Лотфуллин М.В. Движение системы профилей под свободной поверхностью весомой жидкости . Доклад на конференции: «Гидродинамика подводного крыла . движущегося вблизи свободной поверхности жидкости и глиссирующих поверхностей.» Л.: 1982.
28. Лордкипанидзе А.Н. Расчет гидродинамических характеристик тонкого крыла большого удлинения и сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. Доклад на конференции «Гидродинамика подводного крыла . движущегося вблизи свободной поверхности жидкости и глиссирующих поверхностей.»Л.:1982
29. Ткач А. Я. О влиянии весомости среды на гидродинамические характеристики несущей поверхности Проблемы гидродинамики судна. Труды ЛКИ .Л.Изд-во ЛКИ. .1983. С.76-82.
30. Басин М. А., Лордкипанидзе А.Н., Ткач А. Я. Явление вихре-волнового резонанса при исследовании гидродинамических

характеристик подводного крыла, движущегося вблизи свободной поверхности несжимаемой жидкости . Труды НТО СП . Вып. 414, Л.:”Судостроение”1985. Стр.23-31.

31. Басин М.А., Лордкипанидзе А.Н., Ткач А.Я. Решение задачи о стационарном движении несущей поверхности вблизи границы раздела сред. Вихре-волновой резонанс. Труды НТО СП. Вып.1. Л.: 1990.С.115-127
32. Корнейчук А. А. Квадратурные формулы для сингулярных интегралов . Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы. 1964 т.4 №4 Сс.64-74.
33. Мишкевич В.Г. О построении квадратурных формул для сингулярных интегралов , встречающихся в гидроаэродинамике . Вопросы судостроения . Серия : “ Проектирование судов “ 1980. Вып. 23 Сс.98-108
34. Гребные винты . современные методы расчета (Бавин В. Ф.,Завадовский Н.Ю., Левковский Ю.Л. , Мишкевич В.Г)., Л.: “ Судостроение “1983. 236 с.
35. Лотфуллин М.В. Филиппов С.И. Обтекание профиля несжимаемой жидкостью вблизи границ раздела сред. Механика машиностроения . Тезисы докладов II республиканской научно-технической конференции . Секция механики жидкости, газа и плазмы . Брежнев. 1987. С. 44.
36. Щигунов В.Г. Решение нелинейных нестационарных волновых задач вихревым методом. Канд. диссертация . СПб.: СПбГМТУ.
37. Duncan G.G.An Experimental Investigation of Breaking Waves Produced by a Towed Hydrofoil //Proc.R. Soc.London.1981. Vol.A377.
38. Basin M.A. A Wave Formation by the Motion of Surface Ship Hydrodynamic Complex near the Free Boundary. Classification of Nonlinear Waves. Wave-vortex Resonance.// Papers of IMAM 93 Congress/ Ed. by P.A. Bogdanov. Vol.II. Varna. Bulgaria. November 15-20.1993. Pp.51-58.
39. Басин М.А. Основы классификации нелинейных волновых движений , вихрей и транспортных систем //Синергетика и методы науки. Под. ред. М.А.Басина. СПб. «Наука» 1998. Сс.95-131.
40. Басин М. А., Завадовский Н.Ю. Модель двойного спирального вихря как предельная форма свободной поверхности нестационарного течения идеальной несжимаемой жидкости

- .Труды семинара по краевым задачам. Вып.22.. Казань: КГУ. 1985.
41. Басин М.А., Шапошников И.Г. Новая модель нестационарного течения около крыла в невязкой жидкости. Математическое и физическое моделирование в гидродинамике судна . Труды НТО СП . Выпуск 18. Л.: Судостроение .1989. С.27-38.
 42. Lanchester F. W. Stability of an Aerodrome. Доклад на собрании Бирмингемского общества. 19 июля 1884.
 - 43 Lanchester F. W. Aerodynamics. London 1907
 - 44 Аэродинамика . Под общей редакцией Р.Ф. Дюренд. Том I. ОНТИ НКТП СССР . 1937. 436 с.
 - 45 Жуковский Н. Е О наивыгоднейшем угле наклона аэропланов. Воздухоплавание и исследование атмосферы. Вып.1. 1897
 - 46 Kutta W. M. Auftriebskrafte in stromenden Flussigkeiten. Illustrierte aerodynamische Mitteilungen. 1902. S.133.
 - 47 Жуковский Н.Е. О присоединенных вихрях . Сообщена автором в Московском математическом обществе 15 ноября 1905 и напечатана в трудах отделения физических наук ОЛЕ т. XIII. Вып.2 1906.
 - 48 Чаплыгин С.А. О давлении плоско-параллельного потока на преграждающие тела . Московский математический сборник №28 . 1910.
 - 49 Longue -Higgins M. S., Fox M. J.H. Theory of the almost -highest Wave . The Inner Solution . -Journal of Fluid Mechanics. 1977 V.80 . Pp.721-742.
 - 50 Лайтхилл Дж. Волны в жидкости . М.: Мир. 1981. 600 с.
 - 51 Юэн Г. Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. Механика. Новое в зарубежной науке. №.41. М.: Мир. 1987. 184 с.
 - 52 Нелинейные волновые процессы . Механика. Новое в зарубежной науке №.42 . М.: Мир. 1987. 296 с.
 - 53 Амромин Э.Л., Басин М.А. Бушковский В.А. Два решения пространственной задачи о предельных волнах на поверхности весомой жидкости. Прикладная математика и механика т.54. N1. 1990.
 - 54 Xu H., Yue D.K. P. Numerical Study of Three-dimensional Overturing Water Waves// Proc/ of 7th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies. 1992. Pp.213-216.
 - 55 Маклаков Д.В. Нелинейные задачи гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами. М.: «Янус-К». 1997. 280 с.

- 56 Басин М.А. Об изменении вектора суммарной завихренности сплошной среды при движении в ней твердого тела и при движении ее внутри твердого сосуда. ИАН СССР. Механика жидкости и газа №1 М.: 1984.
- 57 Басин М.А. Изменение моментов поля завихренности жидкости при движении в ней твердого тела// Совершенствование ходовых , мореходных и маневренных качеств судов. Материалы по обмену опытом. Вып. 400. Л.: "Судостроение". 1984. С.49-54
- 58 Басин М.А. Основные уравнения вихревого движения жидкости. Вихре-волновой резонанс. Материалы по обмену опытом. Труды НТО СП. Л.:Судостроение. 1990.
- 59 Basin M.A. Basic Equations of Vortex Fluid Motion. Vortex-Wave Resonance. IUTAM Symposium on Separated Flows and Jets. Novosibirsk: USSR 1990. Pp.39-41 Springer - Verlag. Berlin - Heidelberg 1990. V. V. Kozlov , A.V. Dulov (Editors).Pp.113-116.
- 60 Basin M. A. Basic Equations of Vortex Fluid Motion. Selected Papers.Vol.1. Applied Hydrodynamics. St-Petersburg. State Marine Technical University. 1993. Pp. 23-34.
- 61 Басин М.А., Корнев Н.В., Захаров А.Б. Аппроксимация трехмерных вихревых полей. Труды Центрального научно-исследовательского института морского флота. СПб.:1993. 184-196.
- 62 Басин М.А., Корнев Н.В. Аппроксимация поля завихренности в неограниченной среде. ЖТФ РАН, Ноябрь, 1994, СПб. Сс. 179-185
- 63 Basin M.A., Kornev N.V. New Computational Method of Vortex Dynamics. Report on the Euromech Colloquium 315. Nurnberg Erlangen. Germany. March.1994.
- 64 Basin M.A., Kornev N.V.Approximation of Vorticity Field in an Unbounded Volume. Tech. Phys. 39 (11) 1994, American Institute of Physics. Pp.1184-1187
- 65 Basin M.A., Kornev N.V. Vortex Methods in Hydrodynamics. International Symposium on Ship Hydrodynamics Devoted to 85-th Anniversary of Birthday of Abram M. Basin (ISSH).St-Petersburg, May, 1995, pp.431-450
- 66 Basin M.A., Kornev N.V. Berucksichtigung der Reibung in der Wirbelmethode. ZAMM.78 №5 1998.Ss.29-52.
- 67 Basin M.A.Kornev N.V. A Way to Split the Navier-Stokes Equations in the Context of Vortex Method. " Communications in Numerical Methods in Engineering "

- 68 Басин М.А., Лордкипанидзе А.Н., Ткач А.Я. Гидродинамические характеристики несущего комплекса, движущегося вблизи свободной поверхности весомой жидкости. Труды Семинара по краевым задачам. Выпуск 26 Аэродинамика течений с неизвестными границами Казань: КГУ 1991. Сс.29-59
- 69 Basin M.A., Lordkipanidze A. N., Tkach A. Ja. Vortex-Wave Resonance in the Hydrodynamics of Foil, Moving near the Interface of the Different Density Media // Waves and Vortices in the Ocean and their Laboratory Analogues. The Fifth Annual Workshop of the Commission on the Problems of the World Ocean. Vladivostok, September 23-29. 1991. Pp.15-16.
- 70 Басин М.А. Основы классификации нелинейных волновых движений и вихревых структур. Явление вихре-волнового резонанса при движении несимметричных тел в неоднородной жидкости// Проблемы гидромеханики в освоении океана Материалы конференции по прикладной гидромеханике Киев ИГМ АНУ 1992 Сс.192-193
- 71 Basin M.A. Wave Formation by the Motion of a Surface Ship Hydrodynamic Complex near the Free Boundary . Classification of Nonlinear Waves. Wave-Vortex Resonance. Proceedings of the VI Congress of the IMAM. Edited by Peter A. Bogdanov . Volume II, 15-20 November 1993. Varna. Bulgaria
- 72 Basin M. A. Vortex-wave Resonance in Hydrofoil Hydrodynamics. International Symposium on Ship Hydrodynamics Devoted to 85-th Anniversary of Birthday of Abram M. Basin(ISSH). St-Petersburg: May, 1995, pp.399-407.(0.6)
- 73 Басин М.А. Вихре-волновой резонанс// Синергетика и методы науки. Труды семинара. . Ответственный редактор М.А. Басин. С.-Пб.“Наука” 1998 .с.415-418.
- 74 Егоров И. Т. , Садовников Ю.М. ,Исаев И. И. Басин М. А. Искусственная кавитация , Л. “Судостроение”1971. 284 с.
- 75 Басин М.А. Лабок Л.Ю. Шалларь А.В. О связи режима обтекания и гадроупругих колебаний крыльевых систем быстроходных судов. НТО СП. Материалы по обмену опытом. Вып. 186 Л:”Судостроение”.1972 Сс.76-87.:
- 76 Егоров И.Т., Басин М.А., Садовников Ю.М., Шалларь А.В. Методика экспериментального исследования нестационарных гидродинамических характеристик кавитирующих подводных крыльев. НТО Судпрома. Экспериментальная гидродинамика

- судна. Материалы по обмену опытом Вып.190. Л.:
"Судостроение", 1972. Сс94-100
- 77 Basin M.A., Shaposhnikov, I. G., Zilist L. P. Problems , Methods and Results in Hydrofoil Cavitation// Proceedings of the Second International Symposium on Cavitation . April 1994 Tokyo, Japan pp.99-105
 - 78 Basin M.A., Borisov R.V., Greengoltz A.I., Guseev A.S. Kagan I.S Theoretical and Experimental Determination of the Forces of Viscous Nature by the Vibration of the Bodies at the Fluid. Proceedings of XV Ubileum Seminar on the Ship Hydrodynamics. Varna: Bulgaria. 1986
 - 79 Басин М. А., Бочагов В. И., Мизина М. Я., Охрименко Г. Г., Пономарев А. В., Сидоров В.П. , Титов В. Г. Результаты теоретико-экспериментальных исследований несущих поверхностей с интерцепторами . Доклад на Всесоюзном семинаре по отрывным течениям. Новосибирск 1988.
 81. Режимы с обострением. Эволюция идеи: Законы коэволюции сложных структур. М. Наука 1998. 255с.
 82. Хакен Г. Синергетика.М.Мир. 1980
 83. Князева Е.Н. Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука. 1994. 238 с.
 84. Синергетика и методы науки (Ред. Басин М.А.) СПб.: Наука 1998. 440 с.
 85. Басина Г. И, Басин М. А. Синергетика. Эволюция и ритмы человечества. СПб. Норма.2003. 260с.
 86. Баранцев Р.Г. Синергетика в современном естествознании. М.: 2003.
 87. Басин М.А. Шилович И.И, Путь в Synergonet. СПб.: Норма. 2004.128с.
 88. Данилов Ю.А. Причудливый мир науки. Саратов: Изд.Гос. УНЦ «Колледж» 2004
 89. Басин М. А. Компьютеры. Вихри. Резонансы. Волновая теория взаимодействия структур и систем. Часть 2. СПб.: Норма. 2002. 144с.
 90. Басина Г.И., Басин М.А. Синергетика. Основы методологии. СПб.: Норма. 2006. 56с.
 91. Иванов А. Н. Теоретическое исследование гидродинамических характеристик крыльевых профилей при кавитации. Материалы IX научно-технической конференции по теории корабля. Л.: "Судостроение 1968

92. Иванов А.Н. Кавитационное обтекание профилей крыльев . ИАН СССР . Серия механики и машиностроения 1960 Вып.6 С.117-119 .
93. Tulin M. P. Supercavitating Flow past Foils and Struts . Symposium on Cavitation in Hydrodynamics . London 1956
94. Tulin M. P. Supercavitating Flows . Small Perturbation Theory . J.S.R.1967 , Vol 7. №3.
95. Guerst J. A. Linearized Theory for Partially Cavitating Hydrofoil . International Shipbuilding Progress 1959 Vol 6. № 60
96. Wade R.B. Linearized Theory for Partially Cavitating Plane -Convex Hydrofoil Including the Effects of Camber and Thickness. J. R. 1967 Vol. 11 №1.
97. Терентьев А.Г. Плоские стационарные задачи теории струйных и кавитационных течений . Автореферат докторской диссертации . Казань КГУ 1972.
98. Косов Б.В. , Шалларь А. В. Гидродинамические характеристики профилей крыльев в переходном режиме кавитационного обтекания . Материалы по обмену опытом . Труды НТО СП . Экспериментальная гидродинамика судна.Вып.226. .Л."Судостроение"
99. Басин М.А., Шалларь А.В. Нестационарная схема обтекания кавитирующего крыла установившимся потоком. Труды НТО СП. Вып.192 .Л."Судостроение" 1973
100. Кнэпп.Р. Дейли Дж.,Хэммит Ф. Кавитация . М.: "Мир" 1974.
101. Ильин В. П. Структура и шумообразование при пленочной кавитации. Всесоюзный симпозиум по проблемам кавитации. Одесса .1971.
102. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений . Л.: Селснхжтыбт 1978 224 стр.
103. Walchner O. Profilmessungen bei Kavitation-Hydrmechanische Probleme des Schiffsantriebs. Hamburg 1932
104. Numachi F. Kraftmessungen an vier Flugel -profilen bei Hohlsoog Forschung auf dem Gebiete des Ingenieur wesens. Band 11, №6, 1940.
105. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л."Судостроение"1980 240 с.
106. Meijer M.C. Some Experiments of partly Cavitating Hydrofoils . International Schipbuilding Progress Vol 6. №60 August 1958 .
- 107.. Биркгоф Г. Сарантонелло Э.Струи, следы и каверны. М.: "Мир" "1964.
- 108 Чжен П. Отрывные течения М.: Мир 1972-1973. Тт.1-3.

109. Гогиш Л.В. , Нейланд В.Я. , Степанов Г.Ю. Теория двумерных отрывных течений . Гидромеханика (Итоги науки) 1975.тт7.8
110. Нейланд В.Я. , Степанов Г.Ю. Ламинарные и турбулентные течения . В кн.:” Современные проблемы теоретической и прикладной механики .” Киев : “Наукова думка”1978.С.216-232
111. Гогиш Л.В. , Степанов Г.Ю. Турбулентные отрывные течения М.:”Наука“1979,367с
112. Хёрмандер Л. Анализ линейных дифференциальных операторов с частными производными. В четырёх томах. М.:Мир.1986.
- 113..Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.:Наука. Физматгиз. 1997. 496с.
114. Басин М.А., Косов Б.В. Шалларь А. В. Способ уменьшения сопротивления и вибрации крыльевого гидродинамического профиля .АС №477 879 от 29.03.75. Заявка №1938937 с приоритетом от 2.07.73
115. Басин М.А. , Косов Б.В. , Шалларь А.В. Крыло с системой управления кавитацией , А.С. № 524729 от 22.04.76. Заявка №2023987 с приоритетом от 12.05.74.
116. Косов Б.В. , Шалларь А.В. Крыльевое устройство судна на подводных крыльях .А.С. №1080348 jn 15.11.83 Заявка №3505758 с приоритетом от 08.07.82.