

*Воскобойник В.А.*

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ СО СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКОЙ

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования вихревых структур внутри сферической лунки на плоской стенке и распределения давления на обтекаемой поверхности лунки и вблизи нее.*

**Ключевые слова:** сопротивление, давление, канал, лунка, вихрь

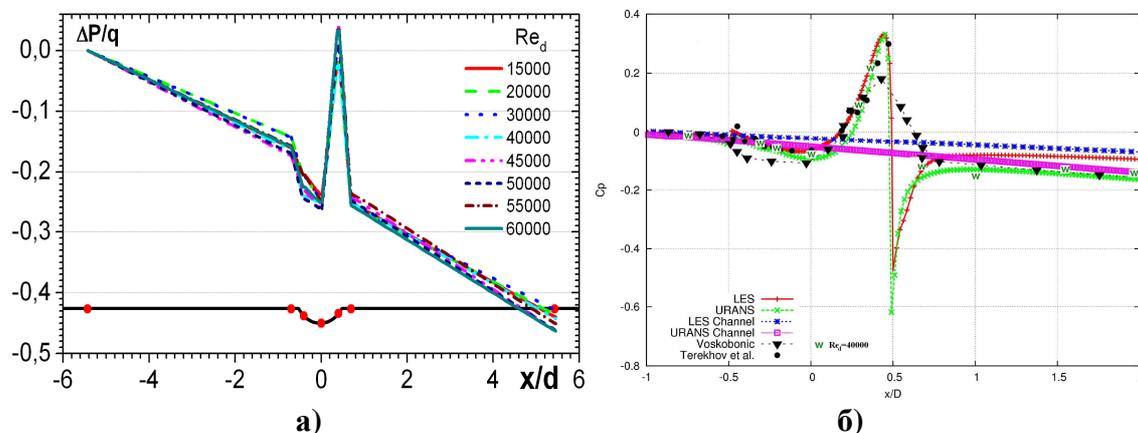
**Постановка проблемы.** Требование энергосбережения в технологических процессах судостроения, теплоэнергетики, машиностроения, авиации и других отраслях народного хозяйства обуславливает применение таких конструктивных решений, которые при минимальных затратах энергоресурсов дают максимальную эффективность. К таким решениям на обтекаемых поверхностях относятся луночные поверхности. Они имеют уникальные гидродинамические способности, такие как превышение темпа роста тепло и массообмена над ростом гидравлического сопротивления, обусловленное генерацией пульсирующего вихря внутри лунки, управление пограничным слоем и отрывным течением и некоторые другие. Эти способности эффективно использованы в различных применениях, таких как ядерная энергетика, теплообменные системы, газотурбинные установки и аппараты для плавания и полетов.

**Анализ последних исследований.** Широкое использование луночных поверхностей обуславливает проведение численных и экспериментальных исследований по определению оптимальной формы и геометрических параметров лунок для получения наибольшей эффективности их эксплуатации. Основной физической механизм действия углубления на поток, обтекающий их – это генерация вихревых структур внутри лунок и выброс их во внешнее течение. Когерентные вихревые структуры существенно влияют на развитие пограничного слоя, отрывных течений и процессов тепло и массопереноса. Первые исследования в этом направлении сделаны Wighart и Presser, потом активно продолжены в России (Кикнадзе, Нагога, Терехов, Исаев, Леонтьев), США (Roshko, Ligrani, Chyu, Moon, Gleser), Украине (Халатов, Гринченко) и других странах. Сегодня в этом направлении вышло несколько монографий, например, [1-3], а за последние 10 лет опубликовано более 500 научных статей. Проблемы определения пространственно-временных характеристик когерентных структур, полей скорости и давления в локальных луночных генераторах вихрей, идентификации вихревых структур, изучение механизмов их генерации и эволюции актуальны не только в академических исследованиях, но и на практике при создании современных транспортных средств и интенсификации процессов тепломассопереноса. Анализ ранее выполненных исследований показывает, что нестационарные характеристики вихревых структур, формирующихся в углублениях различной формы, изучены не в полном объеме. Они ограничены исследованиями частоты флуктуаций вихревой структуры и некоторых данных относительно полей скорости, пульсаций давления и температуры.

**Цель исследований** - определение особенностей формирования вихревых структур внутри и вблизи сферической лунки на плоской стенке узкого гидродинамического канала и распределения давления на обтекаемой поверхности.

**Экспериментальная установка.** Физическое моделирование вихревого течения внутри и вблизи глубокой сферической лунки проводилось в узком гидродинамическом канале Университета г. Росток (Германия). Канал был изготовлен из органического стекла и имел

длину 1,2 м, ширину 0,2 м и глубину 0,015 м. На нижней гидравлически гладкой стенке канала была сделана сферическая лунка диаметром 0,046 м, глубиной 0,012 м и углублением  $h/d = 0,26$ . Центр лунки находился в осевом сечении канала на удалении 0,6 м от конфузора. Вода в канал подавалась насосами из резервуара через успокоительную емкость, где располагалась регулируемая заслонка, обеспечивающая необходимую скорость течения в канале. Из успокоительной емкости вода через входной участок и конфузور поступала в



**Рис. 1. Распределение давления на обтекаемой поверхности в окрестности сферической лунки: (а) для различных чисел Рейнольдса и (б) сопоставление с численными и экспериментальными результатами других авторов**

канал, а затем через промежуточную емкость и выходной трубопровод, где устанавливались заслонки и вспомогательный насос, поступала в резервуар. Более подробная информация об экспериментальном стенде представлена в работе [4]. В экспериментах скорость потока в канале ( $U$ ) изменялась от 0,3 м/с до 1,3 м/с, которой отвечают числа Рейнольдса  $Re_x = Ux/\nu$  от  $1.8 \cdot 10^5$  до  $7.8 \cdot 10^5$  и  $Re_d = Ud/\nu$  от  $1.4 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^4$ , где  $x$  - расстояние от конфузора до лунки,  $d$  - диаметр лунки и  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости воды.

Поле давления на обтекаемой поверхности лунки и стенки канала регистрировалось пьезорезистивными датчиками, которые измеряли статическое и динамическое давление в низкочастотном диапазоне (до 200 Гц). Эти датчики, изготовленные с применением микроэлектронной техники, где радиоэлементы напылялись на кварцевую мембрану, изгибающуюся под действием приложенных нагрузок, пропорциональных давлению, отличались повышенной стабильностью и точностью. В наших исследованиях применялись датчики, специально разработанные и изготовленные для этих целей, которые позволяли измерять давления от 1 Па (0,1 мм водяного столба) до 6 кПа с погрешностью 0,01%.

На обтекаемых поверхностях лунки и стенки канала были сделаны отверстия диаметром 0,2 мм, в которые устанавливались пьезорезистивные датчики давления. Электрические сигналы датчиков через мостовые и полумостовые схемы поступали на контрольно-измерительную и регистрирующую аппаратуру, а далее через аналогово-цифровые преобразователи на персональные компьютеры. Здесь результаты измерений обрабатывались и анализировались по специально разработанным программам и методикам [5, 6].

**Результаты исследования.** Изменения перепада давления между измерительными точками, находящимися на обтекаемой поверхности стенки гидродинамического канала и сферической лунки, вдоль продольной оси канала и лунки, показаны на рис. 1. Здесь в нижней части рисунка представлена схема расположения углубления и отверстий на обтекаемой поверхности для отбора давлений. Перепад давления определялся по зависимости  $\Delta P = P - P_0$ , где  $P$  - давление в измерительной точке, а  $P_0$  - опорное давление, измеренное перед лункой на поверхности канала на удалении около 6 диаметров лунки, для различных чисел Рейнольдса. Давление нормировалось скоростным напором ( $q = \rho U^2 / 2$ ) и

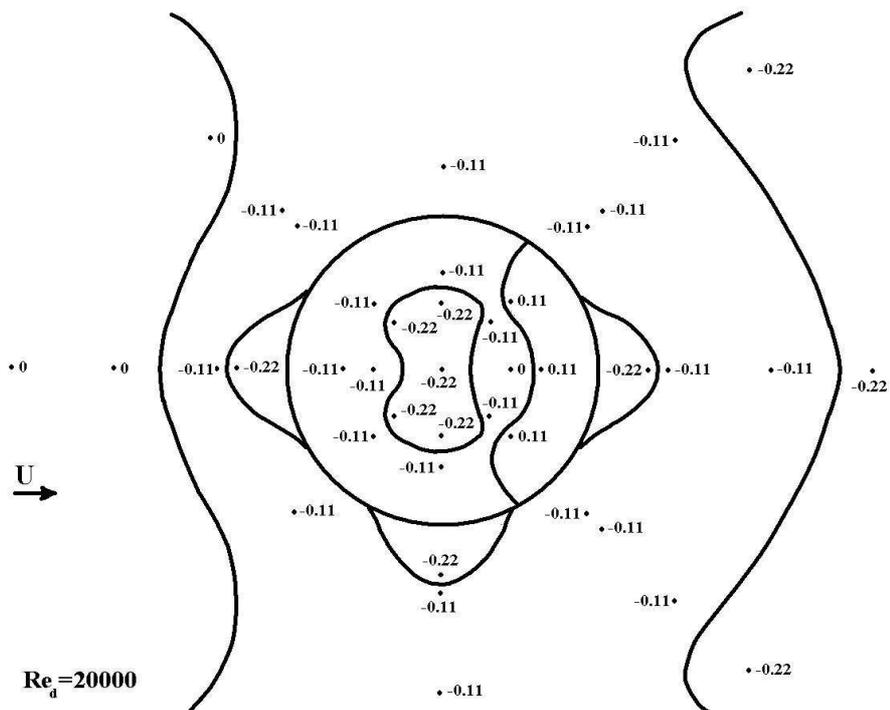
---

показано на рис. 1а, а в виде сопротивления давления  $C_p = \Delta P D_e / qL$  - на рис. 1б. Здесь  $D_e = bH / (b + H)$  - эквивалентный гидравлический диаметр канала,  $L$  - длина канала, на которой измерялся перепад давления  $\Delta P$ ,  $b$  - ширина канала,  $H$  - высота канала. Представленные результаты показывают, что в окрестности кормовой стенки лунки, где происходит взаимодействие вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой, значительно увеличивается давление, формируя острый пик в профиле давлений. В придонной части лунки давление наоборот падает, обусловленное циркуляционным течением жидкости, заполняющей сферическую лунку. Следует указать, что изменение числа Рейнольдса, практически, не оказывает никакого действия на характер поведения нормированных кривых перепадов давления по длине обтекаемой поверхности вдоль продольной оси канала, имеющего локальное углубление в виде сферической лунки.

Характерное изменение давления внутри обтекаемого углубления и вблизи него наблюдается, как в экспериментальных исследованиях, так и в численных расчетах, что показано на рис. 1б. Здесь представлены результаты численного моделирования распределения давления вдоль продольной оси гидродинамического канала, проходящей через срединное сечение сферической лунки углублением 0,26, а также для канала, поверхность которого не нарушена локальным углублением. Расчеты в работах [4, 7] проведены двумя методами – методом крупных вихрей (LES) и методом решений усредненных уравнений Навье-Стокса (URANS). Также на рис. 1б представлены результаты экспериментальных исследований, полученные для числа Рейнольдса  $Re_d = 40000$  в работе [8] и в наших измерениях. Следует отметить, что в целом экспериментальные и численные результаты коррелируют друг с другом, но имеются и некоторые отличия, обусловленные погрешностями измерений и расчетов, а также особенностями математических моделей и экспериментальных стендов. Поле давления, рассчитанное и измеренное внутри углубления, отображает области ускорения и торможения потока вследствие формирования и развития вихревого течения внутри лунки. Наряду с этим следует отметить, что расположение локального углубления исследуемой формы и размеров на стенке узкого гидродинамического канала не приводит к росту местного гидравлического сопротивления канала для турбулентного течения. Это указывает на то, что уменьшение сопротивления трения, образующееся над отверстием углубления, уравнивается увеличением сопротивления формы, которое возникает в результате торможения набегающего потока на кормовой стенке лунки.

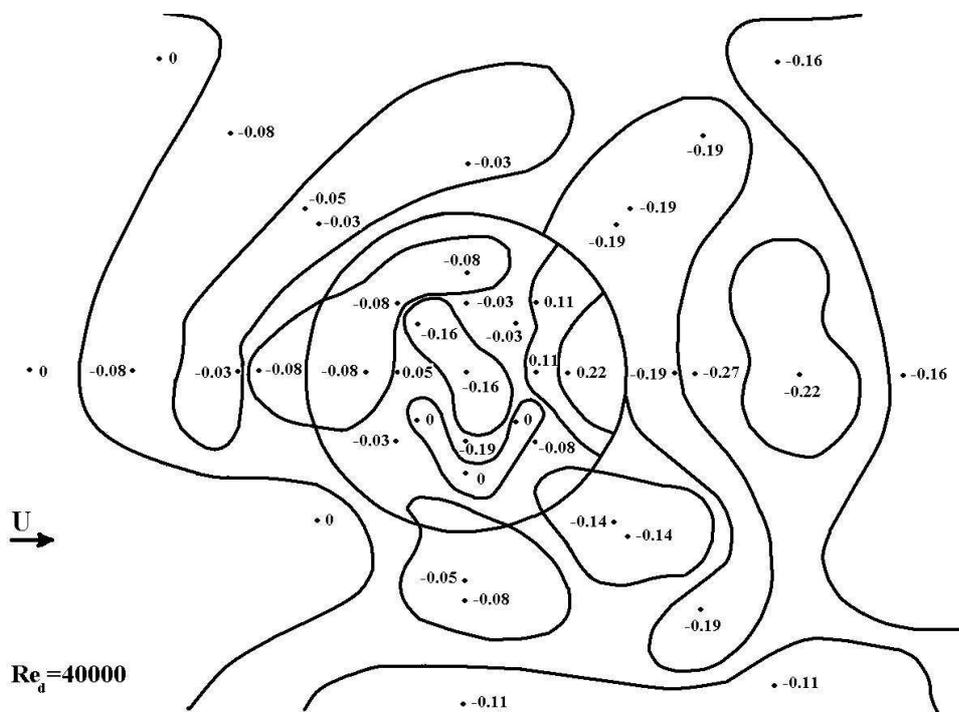
Изменения давления на обтекаемой поверхности сферической лунки и в ее окрестности представлены на рис. 2 для скорости потока 0,43 м/с или  $Re_d = 20000$ .

Здесь отмечены значения перепада давления относительно давлений, измеренных перед сферической лункой, нормированные скоростным напором. Также показаны изобары на поверхности лунки и канала в окрестности сферической лунки. В результате генерации вихрей внутри лунки и их взаимодействия с пограничным слоем вблизи лунки формируются, практически, симметричные относительно срединного сечения области повышенных и пониженных давлений, обусловленные торможением и ускорением потока над обтекаемой поверхностью с локальной неоднородностью. Внутри сферической лунки тоже наблюдаются области торможения и ускорения потока, обуславливающие повышенные и пониженные давления. Симметричность поля давлений отражает симметричность вихреобразования внутри лунки для этого режима течения, что наблюдалось в работе [9]. При этом на кормовой стенке там, где слой смешения и выбрасываемые вихревые структуры взаимодействуют с кормовой стенкой, наблюдаются повышенные уровни давления. Перед лункой, в ее ближнем следе и сбоку обнаружены области пониженных давлений, которые указывают на области ускорения жидкости входящей и выходящей из лунки. В придонной части лунки (в области циркуляционного течения) также наблюдается пониженное давление.



**Рис. 2. Распределение статического давления на обтекаемой поверхности сферической лунки и в ее окрестности для  $Re_d=20000$**

Распределение давления на обтекаемой поверхности лунки и в ее окрестности для турбулентного режима течения, которому соответствует число Рейнольдса  $Re_d=40000$ , показано на рис. 3.



**Рис. 3. Распределение статического давления на обтекаемой поверхности сферической лунки и в ее окрестности для  $Re_d=40000$**

Следует отметить, что картина изменения давления имеет явно асимметричный характер. Например, область пониженного давления в придонной области лунки наклонена под углом близким к 45 градусам относительно направления течения, что согласуется с местоположением квазиустойчивого крупномасштабного вихря, наблюдаемого для турбулентного течения в визуальных исследованиях [6, 9]. На боковой стороне кормовой стенки там, где выбрасывается эта вихревая система в пограничный слой, регистрируются уровни пониженного давления. Между кромкой лунки, над которой выбрасывается асимметричный вихрь, и придонной областью лунки наблюдается область повышенных давлений, что связано с течением жидкости от кормовой стенки (из области взаимодействия набегающего потока с поверхностью лунки). Эта жидкость, проходящая под асимметричным вихрем, дойдя до передней стенки, частично уносится в источник вихря, а частично, формируя циркуляционное течение, огибает квазиустойчивый крупномасштабный вихрь, подпитывая его энергией набегающего потока. Как показывают визуальные исследования и инструментальные измерения поля пульсаций пристеночного давления [5, 9], этот вихрь совершает осциллирующие движения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Часть асимметричного вихря, а нередко и весь вихрь выбрасываются над кормовой стенкой, перемещаясь в виде продольной вихревой системы в пограничный слой позади лунки. Это приводит к трансформации поперечной или вернее сказать наклоненной под углом 45 градусов к направлению потока завихренности в продольную завихренность. Когда асимметричный крупномасштабный вихрь выбрасывается над одной из боковых сторон кормовой стенки, то внутри лунки генерируется либо такого же направления вихрь, либо появляется крупномасштабная вихревая система, но направленная перпендикулярно (или почти перпендикулярно) исходной. Источник такого асимметричного вихря располагается на другой боковой стороне передней стенки лунки (в ее придонной части), а сток находится на противоположной боковой стороне кормовой стенки ближе к ее кромке, подобно схеме, предложенной в работе [10]. Как показали результаты визуальных и инструментальных исследований, расположение асимметричных вихрей не равнозначно по продолжительности нахождения в том или ином месте лунки. Один из них регистрируется большую часть времени наблюдений, что и обуславливает асимметричное распределение давления внутри лунки и ее окрестности для турбулентного режима течения (см. рис. 3). Кроме того, необходимо отметить, что в ближнем следе лунки области пониженных давлений имеют место позади кормовой стенки, где наблюдаются повышенные уровни давления, характеризуя то, что здесь течение ускоряется.

Когда измерения проводились при  $Re_d = 60000$ , то асимметричность распределения давления еще больше проявилась. При этом наклон областей торможения и ускорения потока, а, соответственно, повышения и понижения давления стал большим (до 60 градусов), что коррелирует с визуальными исследованиями. В той области кормовой стенки, где большую часть времени находится асимметричная наклонная вихревая структура, давление ниже, чем там, где вихревые структуры слоя смещения взаимодействуют с кормовой стенкой.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований особенностей генерации вихревых структур глубокой сферической лункой на гидравлически гладкой плоской стенке и распределения давления на обтекаемой поверхности лунки и вблизи нее позволили сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при числах Рейнольдса  $Re_d \approx 20000$  внутри сферической лунки генерируется симметричная крупномасштабная аркообразная вихревая система, состоящая из двух симметричных вихрей, источники которых находятся на боковых придонных сторонах лунки, ближе к ее передней стенке. Аркообразная система при своей эволюции, увеличиваясь в размере, периодически выбрасывается вблизи срединного сечения лунки.

2. Обнаружено, что для турбулентного режима течения  $Re_d > 40000$  в лунке генерируются крупномасштабные асимметричные вихревые структуры, которые располагаются наклонно к

направлению набегающего потока. Эти вихревые структуры имеют источник на передней стенке в ее придонной части несколько сбоку от срединного сечения лунки. Сток вихревой структуры находится над противоположной кормовой стенкой и периодически вихревая структура выбрасывается наружу из лунки над кормовой стенкой под углом порядка  $\pm 45$  градусов к направлению течения. При этом с увеличением скорости потока угол выброса становится большим, например, при  $Re_d = 60000$  он достигает  $\pm 60$  градусов.

3. Установлено, что на обтекаемой поверхности лунки и в ее окрестности поле давления имеет симметричный и асимметричный характер, обусловленный режимом обтекания лунки и особенностями генерации вихревого течения внутри них. Максимальная интенсивность давления и коэффициент сопротивления давления наблюдается на кормовой стенке лунки, а минимальная - на ее передней стенке.

В дальнейших исследованиях необходимо изучить характер взаимного влияния лунок и вихревых структур, которые они генерируют, на поля скорости, давления и температуры для эффективного проектирования и создания луночных поверхностей оптимальной конфигурации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гортышов Ю.Ф.* Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиаев [и др.]. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
2. *Кикнадзе Г.И.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление / Г.И. Кикнадзе, И.А. Гачечиладзе, В.А. Алексеев. – М.: 2005. – 82 с.
3. *Халатов А.А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А.А. Халатов. – Киев: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
4. *Voskoboinick V.* Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90, № 2. – P. 86 – 99.
5. *Воропаев Г.А.* Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки / Г.А. Воропаев, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник [и др.] // Акустичний вісник. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 27-49.
6. *Воскобойник А.В.* Бифуркация вихревого течения внутри сферической лунки в узком канале / А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, С.А. Исаев [и др.] // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 3–21.
7. *Turnow J.* Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples / J. Turnow, N. Kornev, S. Isaev, E. Hassel // Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47, № 3. – P. 301-313.
8. *Терехов В.И.* Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной / В.И. Терехов, С.В. Калинина, Ю.М. Мшвидобадзе // Сибир. физ.-техн. ж. – 1992. – Вып. 1. - С. 77-86.
9. *Воскобійник В.А.* Вихрова течія усередині глибокої сферичної лунки / В.А. Воскобійник // Вісник НАУ. – 2012. – Т. 50, № 1. – С. 144-150.
10. *Snedeker R.S.* Observation of a bistable flow in a hemispherical cavity / R.S. Snedeker, C.P. Donaldson // AIAA J. – 1966. – Vol. 4, № 4. – P. 735-736.

**Воскобійник В.А.**

### **РОЗПОДІЛ ТИСКУ НА ОБТІЧНІЙ ПОВЕРХНІ ЗІ СФЕРИЧНОЮ ЛУНКОЮ**

*У роботі наведено результати експериментальних досліджень особливостей формування вихрових структур усередині сферичної лунки на пласкій стінці і розподіл тиску на обтічній поверхні лунки та поблизу неї.*

**Ключові слова:** опір, тиск, канал, лунка, вихор

---

---

Voskoboinick V.A.

## PRESSURE DISTRIBUTION ON STREAMLINED SURFACE WITH SPHERICAL DIMPLE

*The results of experimental researches of vortex structure features inside the spherical dimple on flat wall and the pressure distribution on the streamlined surface and nearby dimple are presented in this paper.*

**Keywords:** drag, pressure, channel, dimple, vortex

УДК 349.3:341.225.5

Давидова Ю.Є.

## АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ДОТРИМАННЯ ПРАВ УКРАЇНСЬКИХ МОРЯКІВ НА МОРЬСЬКОМУ РИНКУ ПРАЦІ

*У статті розглянуті основні проблемні питання порушень прав моряків та запропоновано вирішення їх на державному рівні.*

**Ключові слова:** морська галузь, «зручні» прапори, український прапор, порушення прав, захист прав.

Продовжуючи вивчати актуальні проблеми що стосуються праці моряків [1] на іноземних судновласників, в даній статті розглядається проблема взаємовідносин в галузі праці між українськими моряками та судновласниками, судна яких ходять під так званими «зручними прапорами».

До дослідження цього актуального питання неодноразово звертались вітчизняні та зарубіжні фахівці в галузі морського права, такі як В.Н. Гуцуляк, Г.С. Горшков, Г.А. Анцелевич, В.В. Серафімов, О.М. Шемякін, Л.М. Давиденко та інші, не переменшуючи ролі та значимості згаданих науковців, потрібно визнати, що питання захисту прав моряків, що працюють під «зручними прапорами» потребує подальших досліджень.

Україна, займає п'яте місце в світі за кількістю моряків, тому що українські моряки вміють працювати в командах, досить легко і швидко адаптуються в них, вигідно вирізняються статурою і фізичною силою. Це імponує зарубіжним працедавцям, бо поєднання індивідуалізму й узгодженості має велике значення на такому специфічному ринку робочої сили, як морський.

За даними автоматизованої інформаційної системи Державної інспекції України з безпеки на морському та річковому «Реєстр посвідчень особи моряка», видано 323 750 посвідчень особи моряка (станом на кінець 2011 р.). З них діючими є 112 691 посвідчення, отримане громадянами України ці дані відображенні в табл.1.

Українські моряки, що мають діючі посвідчення, обслуговують судна вітчизняних та іноземних власників, які ходять під національним і «зручними» прапорами інших держав, більшість моряків працює таки під «зручними» прапорами.

«Дешеві» прапори («зручні» прапори) – прапори на морських суднах, зареєстрованих в судових реєстрах країн, в яких низькі державні податки на утримання кораблів і екіпажу, полегшені і спрощені правила реєстрації і експлуатації суден, понижений контроль за вантажами, що перевозяться.