

Цей винахід зв'язаний з набагато більш ефективним методом і пристосуванням для зниження опору пластин або апаратів, що рухаються відносно рідини, і внутрішніх течій, таких як рідини, що рухаються через морські водометні рушії. Винахід може бути використаний для упорскування добавок у певні області пограничного шару, щоб модифікувати реологічні властивості рідини без небажаного руйнування пограничного шару, і без швидкої дифузії добавки в пограничному шарі, властивих традиційним методикам упорскування.

У минулому ефективність та економічність зниження опору, одержаного шляхом упорскування неньютоновських добавок у "зовнішні" турбулентні течії в пограничних шарах, були обмежені в порівнянні з ефективністю й економічністю, що спостерігаються у "внутрішніх" або трубних течіях. У турбулентних трубних течіях з високим числом Рейнольдса спостерігається зниження опору тертя від 70 до 80%, у той час як при ежекції в турбулентні течії з високим числом Рейнольдса на плоскій пластині максимальне зниження опору тертя було тільки від 40 до 60%. Далі, високий рівень витрати домішки, потрібний в зовнішніх течіях, обмежив економічну вигоду застосування систем введення домішки на морських транспортних судах. Методики ежекції для введення домішки в зовнішні течії також вносять нестійкість і, у деяких випадках, несприятливі градієнти в'язкості в пограничний шар, так що втрати, зв'язані з процесом ежекції, приводять до значного зменшення сумарного ефекту. Необхідний більш ефективний метод для введення добавок у пристінну область пограничного шару для зниження опору.

У прототипах удосконаленій були спрямовані на перемішування домішки і генерацію бульбашок, і мало уваги приділялося ежектору. U.S. Patent No.4,186,679 авторів Fabula і ін. (виданий 5 лютого 1980р.) характеризує обмежену увагу, що приділяється системі ежекції. У цьому випадку ежектор визначається як "безліч скошених назад отворів для упорскування". Подібним же чином у U.S. Patent No.4,987,844, автор Nadolink (виданий 29 січня 1991р.), фокус зроблений на методах і пристосуваннях для пасивного закачування сольвенту, щоб перемішати різні добавки або суспензії і направити суміш до місця мінімального коефіцієнта тиску для упорскування. Ежектуючий пристрій описується тільки як один із безлічі можливих, а саме "будь-яка сітка, ґрати, пористе середовище, перфорований матеріал, просвердлені отвори визначеної геометрії, кругова щілина, і т.д.", і що "інші форми ежектуючих пристроїв можуть бути використані для досягнення результатів цього винаходу". У U.S. Patent No.5,445,095, автори Reed і ін. (виданий 29 серпня 1995р.), поздовжні ріблети комбінуються з упорскуванням полімеру для передбачуваного керування швидкістю дифузії полімеру. Однак максимальна відстань вниз по потоку, на якій матеріал цілком дифундував від ріблетів, була близько 400 ширин ріблета, що складає порядку сантиметрів для морських транспортних засобів, у той час як для даного винаходу показано, що відстань дифузії є порядку десятків метрів. Як і в інших винаходах, не визначається яка-небудь методика ежекції; тільки приводиться ряд можливих методів. У Japanese Laid Open Patent Application 09151913 і 09151914, автори Mitsutake Hideo і Yoshida Yuki, відповідно, обидва опубліковані 29.11.95р., для зниження опору уздовж зануреної поверхні корабля розподілені бульбашки повітря. У першому з них ежектори - це просто-прямі трубки, одна для повітряних бульбашок і друга вище за течією для рідини. Мається на увазі, що метою ежектора "з високою кінетичною енергією" вище по потоку є захоплювати повітряні пухирці з ежектора вниз по потоку усередині пограничного шару біля зануреної поверхні. Другий патент озаглавлений "Генератор мікробульбашок", але ключовим компонентом є скошений назад (проти потоку) гнучкий генератор бульбашок із синусоїдальною траєкторією. Місце ежектора - це вихід генератора бульбашок, що звернений проти потоку. Ефекти упорскування добавок проти потоку чи руйнування сталого пограничного шару не розглядаються.

Класичне обговорення теорії пограничного шару, включаючи формулювання рівнянь Нав'є-Стокса і рівнянь турбулентного пограничного шару, дане в Boundary-Layer Theory, Dr. Hermann Schlichting, опубліковане McGraw Hill, New York, seventh edition, 1979. Опис структури і масштабів у турбулентних потоках можна знайти в Turbulence, 1975, McGraw Hill, написаній J.O. Hinze, і в "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," у Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, volume 23, pp.601-39, написаній Steven K. Robinson. Потенційна здатність довгих молекул водяних розчинів полімерів знижувати опір тертя, відома зараз як ефект Томса, була представлена В.А. Томса на Першому Міжнародному Конгресі по Реології в Амстердамі в 1948 році, і була опублікована в матеріалах цієї конференції. P.S. Virk і ін. ввели концепцію граничного зниження опору за допомогою розчинів полімерів у статті, озаглавленій "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structures in Toms' Phenomenon", опублікованій в ASME Journal of Applied Mechanics, 37, сторінки 488-493, у 1970р. Virk та ін. зв'язували рівень зниження опору з ростом товщини буферної зони, що, у свою чергу, обмежений діаметром труби. Для зовнішніх течій такі фізичні обмеження не накладаються. Однак D.T. Walker, його професор W.G. Tiederman і колега T.S. Luchik у статті, озаглавленій "Optimization of the ejection process for drag-reducing additives" і опублікованій в Experiments in Fluids, 4, с.114-120 у 1986р., одержали межі зниження опору для щільного упорскування на 20-40% менші, чим максимальне зниження опору, що спостерігається в трубних плинах. Ці спостереження були підтверджені іншими, наприклад Yu.F. Ivanyuta і A.A. Khomyakov у їхній статті "Investigation of Drag Reduction Effectiveness with Ejection of Viscoelastic Polymer Solutions", опублікованій в Proceedings of the International Shipbuilding Conference, KRSI, October, 1994, St. Petersburg, стор.163-170, російською мовою.

Хоча рідкі розчини полімерів поведуться як ньютонівські рідини в ламінарних потоках, A. Gyr і H.W. Bewersdorff у їхній роботі Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, Kluwer Academic Publisher, 1995, підкреслюють, що в деяких ламінарних течіях, таких як потоки, що звужуються, розчини полімерів показують неньютоновську поведінку. Гіпотеза полягає в тому, що в таких течіях, як і в турбулентному потоці, довгі молекули полімеру розтягуються (розгортаються і подовжуються) і вишиковуються уздовж потоку, що є необхідною умовою для того, щоб розчин представляв неньютоновську поведінку. V.G. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta і S.Y. Frenbel у їхній статті "The Structure of the Hydrodynamic Field and Directions of the Slope of Flexible Polymers Under Free-Converging Flow Conditions", опублікованій російською мовою в Polymer Science USSR, Vol.34, No.3, 1992, визначають умови, при яких молекули полімеру можуть розгортатися, вирівнюватися і витягуватися достатньо для того, щоб стати ефективними для зниження опору.

Експерименти C.S. Wells і J.G. Spangler, описані в їхній статті "Injection of a Drag-reducing Fluid into

Turbulent Pipe Flow of a Newtonian Fluid", надрукованої в The Physics of Fluids, Vol.10, No.9, pp.1890-1894, M.M. Reischman і W.G. Tiederman, описані в статті "Laser-Doppler Anemometer Measurements in Drag-reducing Channel Flows", опублікованій в Journal of Fluid Mechanics.Vol.70. Part2, pp.360-392 у 1975р.; і W.D. McCombs і L.H. Rable у "Local Drag Reduction Due to Injection of Polymer Solutions into Turbulent Flow in a Pipe", Parts I and II, опублікованій в AICh Journal, Vol.28, No.4, pp.547-565, July 1982, ясно показали, що добавки полімеру можуть знижувати опір, коли вони знаходяться в пристінній області турбулентного пограничного шару, відомій як буферна зона. У в'язких пристінних одиницях, далі позначених y^+ , що є значеннями довжини, обезрозміреної по динамічній швидкості і кінематичній в'язкості, ця область знаходилася на відстані приблизно від 20 до 100 в'язких одиниць від стінки. Було відзначено, що при високому рівні зниження опору буферна зона товщає і простирається до декількох сотень в'язких довжин. Не було помічено ніякого зниження опору чи зв'язаних з ним ефектів у випадку, коли полімер був обмежений областю, де в'язкі напруження зсуву переважають над напруженнями Рейнольдса, тобто до відстані близько 12 в'язких довжин. Загальноприйняте в літературі значення y^+ дорівнює 11.6. Як показано багатьма, включаючи A.A. Fontaine, H.L. Petrie, T.A. Brungart у статті "Velocity Profile Statistics in a Turbulent Boundary Layer with Soft-Injected Polymer", опублікованій в J. Fluid Mechanics, Vol.238, pp.435-466, 1992, потік через цю область на одиниці розмаху Q_e дорівнює величині 67.3, помноженій на кінематичну в'язкість рідини. Для даної рідини при даній температурі ця витрата не залежить від швидкості вільного потоку і відстані від початку пограничного шару.

У той час як чутливість зниження опору до розміщення добавки усередині пограничного шару визнається з 1967 року, елегантна робота M. Poreh і J.E. Cermak, опублікована в Int Journal Heat & Mass Transfer, No.7 у 1964 році, переконала більшість дослідників, що дифузія ежектованої рідини була небажаною і швидкою. Тому, як викладено в роботах J.W. Hoyt, A.G. Fabula, "Friction Drag Resistance in Towing Tanks", опублікованій в Proceedings of 10th Industrial Towing Tank Conference, Teddington England у 1963, T. Kowalski "The Effect in Resistance of Polymer Additives Injected into the Boundary Layer of a Frigate Model", опублікованій в Transactions of the Eleventh International Towing Tanks Conference of Ship Tank Superintendent, Tokyo, 1966, H.L. Dove H.J. Canham HMS Highburton Speed Trials with Polyox Injection into the Boundary Layer, опублікованій в AEW Report No.11/69, W. Xiliang, D. Yongzuan, X. Changsheng, W. Guigin "Drag Reduction by Polymer Injection Described", опублікованій в Shipbuilding of China, No.66, pp.45-57, July 1980, і радянських дослідників, описаних у B.F. Dronov, B.A. Barbanel "Early Experience of BLC Technique Usage in Underwater Shipbuilding", Proceedings of Warship 99, Naval Submarine 6, Royal Institute of Naval Architects, London, June 1999, дослідники використовували широку матрицю похилих щілин чи кругових отворів, щоб ежектувати достатньо речовини для наповнення всього пограничного шару. Унаслідок визнання швидкої дифузії не тільки в пограничному шарі, але навіть поза ним, кількість ежектованого матеріалу могла бути часто в кілька разів більша, ніж розраховано для наповнення всього пограничного шару при його найбільшому протязі. Швидкості ежекції були звичайно одного порядку зі швидкістю вільного потоку, і масова витрата вприснутого потоку часто перевищувала $100Q_e$.

У статті "Suppressed Diffusion of Drag-reducing Polymer in a Turbulent Boundary Layer", опублікованій в Journal of Hydraulics.No.6. J. Wu, і потім D. Collins у тезах "A Turbulent Boundary Layer with Slot Injection of Drag-reducing Polymer" у Georgia Institute of Technology у липні 1973 року, уперше доповіли про більш низьку швидкість дифузії для розчину полімеру, ніж було загально визнано. У 1989 році D.T. Walker і W.G. Tiederman підтвердили ці спостереження в статтях "Simultaneous Laser Velocimeter and Concentration Measurements", опублікованій в Journal of Laser Applications 1, pp.44-48 у 1989р., і "The Concentration Field in a Turbulent Channel Flow with Polymer Injection at the Wall", опублікованій в Experiments in Fluids, 8, pp.86-94 у 1989р. На початку 1990-х зростало розуміння, що робота Poreh і Cermak, узятя як стандарт для поведінки дифузії, може бути застосовна тільки для введення "пасивних" домішок у турбулентний потік. Тобто "активні" домішки, такі як водяні розчини полімерів з високою молекулярною вагою, що впливають на характер турбулентності і, таким чином, на процес дифузії, не поведуться подібним чином; дифузія може бути більш поступовою. Це було підтверджено T.A. Brungart, L.L. Petrie, W.L. Harbison, C.L. Merkle у їхній роботі "A Fluorescence Technique for Measurements of Slot-injected Fluid Concentration Profiles in a Turbulent Boundary Layer", опублікованій в Experiments in Fluids, 11 у 1991. У наступному році S.T. Sommer і L.L. Petrie опублікували "Diffusion of slot-injected drag-reducing polymer solution in a LEBU-modified turbulent boundary layer" у Experiments in Fluids, 12, де вони показали для відносно високошвидкісних потоків, що контроль або модифікація поля зовнішнього потоку біля ежектуючого струменя за допомогою пари пристроїв, що руйнують великі вихори, (LEBU), далі знижує швидкість дифузії полімеру в пограничному шарі. A.A. Fontaine, L.L. Petrie і T.A. Brungart у статті "Velocity Profile Statistics in a Turbulent Boundary Layer with Slot-injected Polymer", опублікованій в Journal of Fluid Mechanics, 238, pp.435-466 у 1992р., показали, що зниження масової витрати ежектованої рідини в два рази і подвоєння концентрації для підтримки постійної швидкості витрати полімеру давали подальше зниження швидкості дифузії.

W.B. Amfilokhiev, B.A. Barbanel, N.P. Mazaeva у статті "The Boundary Layer with Slot Injection of Polymer Solutions", підготованій для European Drag Reduction Meeting, 16-17 March, 1997, підкреслювали, що досвід показав, що одна щілина з дуже великою концентрацією працювала набагато краще, ніж якщо таку ж чи більшу кількість добавки було ежектовано через набір щілин уздовж довжини судна. Емпірично обґрунтоване уявлення було підтверджено Tiederman, Luchik, Bogard у роботі "Wall-Layer Structure and Drag Reduction", опублікованій в Journal of Fluid Mechanics, 156, pp.419-437 (1985), де вони показали, що ежекція навіть з помірною швидкістю подачі була руйнівною для пограничного шару і викликала збільшення локального опору тертя в місці ежекції, вище і нижче по потоку. W.M. Kays і M.E. Crawford у тексті Convective Heat and Mass Transfer, опублікованому McGraw-Hill, Inc.(1993), third edition, pp.226-230, підкреслюють, що якщо відношення потоку маси другої, або ежектованої, рідини до потоку маси рідини у вільному потоці, або першої, перевищує 0.01, то пограничний шар "буквально зметається з поверхні стінки".

Добре резюме своїх досліджень, а також досліджень інших експериментаторів з інжекцією газу, представили C.L. Merkle і S. Deutsch у статті "Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection". Стаття включена в текст Viscous Drag Reduction in Boundary Layers під ред. D.M. Bushnell і J.N. Hefner, Vol.123, pp.351-410, і опублікована в 1990р.

Заявка U.S. patent application, серійний номер 09\2236783, "Method for Reducing Dissipation Rate of Fluid Ejected into a Boundary Layer", подана 31 грудня 1998р., і виданий на неї патент U.S. Patent No. 6,138,704 описують метод введення упорядкованої завихреності в ежектовані знижуючі опір рідини і вище по потоку від них. Керована і сприятлива швидкість використовується для того, щоб затримати ежектовану рідину в пристінній області й орієнтувати молекули чи структури добавки в такій конфігурації, у якій вони найбільш ефективні.

Дискусію й експериментальні результати по забезпеченню позитивного чи сприятливого градієнта в'язкості в пристінній області можна знайти в роботі J. Kato, Y. Fujii, H. Yamaguchi, M. Miyanaga "Frictional Drag Reduction by Injected High-viscosity Fluid into a Turbulent Boundary Layer", опублікованій в Transaction of, the ASME, 115, pp.206-211, June 1993. Зворотний ефект виникнення негативного градієнта в'язкості при інжекції полімеру був зафіксований у зазначеній вище статті C.S. Welch і J.G. Spangler (1967) і в статтях J. Wu, M. Tulin, таких як "Drag Reduction by Ejecting Additive Solutions into a Pure Water Boundary Layer", опублікована в Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering у 1972р. У згаданій вище статті 1994 року російською мовою Yu.F. Ivanyuta і A.A. Khomyakov представили теоретичний аргумент, що позитивний градієнт в'язкості буде сприяти стабілізації ламінарного потоку. Потім вони представили результати серії експериментів у турбулентному потоці, метою яких було встановити сприятливий градієнт в'язкості, використовуючи спеціальний ежектор. Не були представлені ні геометрія системи ежекції, ні подробиці методу одержання сприятливого градієнта в'язкості, але наведені графіки показують, що зниження буксировочного опору збільшилося приблизно з 50% до 70% на дуже довгому (40м), але з малим діаметром (0.4м) тілі. Вони також повідомляли, що їхні вимірювання локального зниження опору показали постійне поліпшення (більше зниження опору) уздовж довжини буксированого тіла в порівнянні з їх попереднім методом ежекції.

Цілковито окремо від використання добавок для керування пограничним шаром існують методики уповільнення чи виключення відриву потоку, що інакше приводить до підвищеного опору. F.O. Ringleb описав потенційні і можливості "Separation Control by Trapped Vortices" у тексті Boundary Layer Control, Vol.1, під ред. G.V. Lachmann, опублікованому Pergamon Press у 1961, а також у "Discussion of Problem Associated with Standing Vortices and Their applications", представлений на ASME Symposium on Fully Separated Flows in Philadelphia, PA, 18-20 May, 1964. Концепція полягає в тім, щоб забезпечити різку зміну геометрії в області, де траєкторія потоку в іншому випадку є неперервною, але де очікувався б відрив на неперервній поверхні чи стінці. Різка зміна геометрії, така як трансверсальна канавка, може генерувати сильний вихор у канавці. Тому приєднаний потік над вихром огинає канавку і залишається приєднаним нижче по потоку. Ця методика генерації стійкого захопленого вихру використовується для усунення чи зменшення протяжного сліду відривного потоку. Називані іноді вихрами Ринглеба, вони часто використовуються в дифузорах і на тупих тілах.

Обговорення використання пристінних струменів для керування відривом нестисливого турбулентного потоку можна знайти в Control of Flow Separation, автор Paul K. Chang, опублікованій Hemisphere Publishing Corporation у 1976р. Струмені тієї ж рідини, що й у вільному потоці, використовуються для того, щоб перенести вільний потік в область зворотного градієнта тиску. Концепція полягає у використанні надлишку імпульсу пристінного струменя для компенсації втрати імпульсу в пограничному шарі, викликаній поверхневим тертям. Однак без точного балансу цих двох ефектів користь цього методу може бути зменшена чи навіть дати зворотний результат через зростання напружень зсуву на стінці, викликане струменем. Перемішування підсилюється внаслідок того, що струмінь вносить нестійкість у пограничний шар. A.I. Tsygan'uk, L.F. Kozlov, V.N. Vovk, S.L. Maximov описали метод і пристрій для зменшення нестійкості, внесеної пристінним струменем, у винаході "Technique for Control of the Near-wall Layer Flowing Over a Hard Body by the Method of a Control Jet and a Device for Realization of this Technique", опублікованому в Bulletin #30, 30 August, 1990 як Радянське Авторське Свідоцтво S.U. 1585569 A1. Цей метод і пристрій відрізняються від інших систем пристінних струменів для захоплення пограничного шару, оскільки створює вихрову зону в області, де керуючий струмінь присьодується до вільного потоку. Винахід стверджує, що вихрова зона генерується вихровою камерою, коли вона має вихід у струмінь, рівний приблизно 0.28 довжини камери.

Даний винахід дозволяє робити неруйнівну ежекцію рідин у визначені шари пристінної області пограничного шару в потоці рідини. Як перший об'єкт, даний винахід підготовлює течію вище по потоку для зменшення початкової дифузії добавки, коли вона поглинається потоком у пограничному шарі. Другий об'єкт винаходу - це підготовка ежектованого потоку і добавки усередині ежектованого потоку таким чином, щоб вона негайно ставала ефективною для зниження турбулентної дифузії і втрат імпульсу усередині ежектованої рідини, коли вона входить у пограничний шар. Третій об'єкт винаходу - це придушення небажаного руйнування сталого поля течії. Четвертий об'єкт винаходу - це виключення несприятливого градієнта в'язкості, властивого ежекції високо концентрованої ньютонівської добавки чи газо-рідинної суміші. П'ятий об'єкт винаходу - це можливість вибіркового розміщення різних добавок у шарах пограничного шару; шостий об'єкт винаходу - помістити добавку чи структуру потоку у визначеному місці над пристінним потоком, щоб захистити пристінний потік, і тим самим далі знизити дифузію ежектованих добавок. Сьомий об'єкт винаходу - уможливити розміщення багатьох наборів ежекторів уздовж довжини пластини чи судна для підтримки оптимальної концентрації матеріалу, тим самим поліпшуючи загальну ефективність системи. Система керування пограничним шаром даного винаходу включає перед-ежекційні процеси, процеси ежекції і після-ежекційні процеси. Перед-ежекційні процеси зв'язані з підготовкою течії вище по потоку для зменшення рівня початкової дифузії до того, як добавка починає діяти в повну силу. Процеси ежекції включають підготовку і направлення ежектованої рідини для прискорення дії добавки по зниженню турбулентної дифузії біля ежектора і придушення внесення нестійкості в пограничний шар, як вище, так і нижче по потоку від місця ежекції. Масова витрата ежектованої рідини вибирається на підставі параметрів пристінного потоку сталого пограничного шару так, щоб уникнути небажаного збільшення рівня турбулентності.

Оскільки процес ежекції буде набагато менш руйнівним, ежекцію можна застосовувати одночасно в декількох місцях без негативних ефектів, які спостерігаються при традиційних методиках ежекції добавок.

Далі, індивідуальні ежектери можна розміщувати прилегло один до одного, щоб дозволити ежекцію різних добавок у визначені шари пограничного шару вниз по потоку, тим самим забезпечуючи контроль реологічних характеристик пограничного шару, таких як встановлення і підтримання сприятливого градієнта в'язкості після ежекції. Ежектуючий апарат містить унікальний набір рідинних пристроїв, включаючи трансверсальні виїмки, вихрові камери, поверхні Коанда, внутрішні сопла і гострі кромки.

Даний винахід відрізняється від усіх попередніх ежектерів добавок тим, що істотно знижує завихреність, внесена вгору і вниз по потоку від краю ежектера. Воно підготовлює течію вище по потоку, щоб знизити рівень турбулентності і, тим самим, дифузію біля ежектера. Воно приводить добавку в стан, коли вона є розгорнутою, вирівняною і розтягнутою перед тим, як вона потрапляє в зовнішній потік пограничного шару. Також, воно створює умови вниз по потоку, утримуючи бульбашки вдаліні від стінки і встановлюючи сприятливий градієнт в'язкості на стінці безпосередньо вниз по потоку від ежектера. Жодна система ежекції з прототипів не дозволяє неруйнівне введення добавок у визначені шари пристінної області пограничного шару, як у даному винаході.

Даний винахід стане більш зрозумілим з детального опису, поданого нижче, і супровідних малюнків, що подані винятково з метою ілюстрації і не є обмежувачами для даного винаходу, де:

Фіг.1 - це схема основного ежектуючого елемента системи ежекції.

Фіг.2A-2C представляють деякі можливі профілі трансверсальних виїмок, що можуть бути розміщені безпосередньо вниз по потоку від ежектера. Фіг.1A показує профіль еліптичної канавки. Фіг.1B показує профіль виїмки, що може наповнюватися добавкою через сопло з поверхнею Коанда в нижньому по потоку донному куті виїмки. Фіг.2C показує профіль виїмки, що може наповнюватися добавкою через сопло на верхній по потоку кромці виїмки.

Фіг.3 - це схематичний поперечний переріз однієї з можливих конфігурацій з потрібним ежектером. У цій конфігурації еліптична виїмка розміщена нагору по потоку від першого ежектера і має сполучення з вихровою камерою першого ежектера. Це дозволяє добавці з вихрової камери наповнювати виїмку і робить непотрібним влаштування подаючого каналу до виїмки. Другий ежектер розміщений для упорскування іншої добавки під рідину з першого ежектера. Нижче по потоку від другого ежектера знаходиться менший ежектер, розмір якого відповідає масовій витраті рідини, що буде впрорнуто під шар рідини, ежектованої з двох ежектерів вище по потоку.

Фіг.4 - це система, подібна до Фіг.3; але, замість виїмки, маленький ежектер розміщений вище по потоку від першого ежектера.

Даний винахід базується на уявленні, що рівень і ефективність зниження опору, досягнутого за допомогою цілісної ежекції добавок, є сумарним результатом сприятливих і несприятливих ефектів, зв'язаних із процесом ежекції. Цей винахід виключає чи придушує несприятливі ефекти і прискорює ініціювання і подовження сприятливих ефектів, тим самим збільшуючи значення досяжного зниження опору і скорочуючи об'ємну витрату добавки. Негативні ефекти ежекції високих концентрацій розчинів полімеру і сумішей з газовими мікробульбашками - це введення додаткової нестійкості в пограничному шарі в локальній області навколо ежектера, збільшення рівня турбулентності, і розвиток несприятливого градієнта в'язкості в області стінки. Ці ефекти сприяють збільшенню локального опору і більш швидкій дифузії добавки з області пограничного шару, де вона ефективна. Зокрема, винахід обмежує, а не сприяє дифузії добавки з буферної зони пограничного шару.

Щоб зменшити руйнування сталого пограничного шару і швидко дифузії ежектованої добавки, ежектер даного винаходу використовує унікальну комбінацію заснованих на струминній техніці конфігурацій. Конфігурації включають сопло в основі або "горлі" ежектера з діаметром виходу 14 (позначається надалі як h_1 з метою обчислення всіх інших елементів ежектера), поверхню Коанда в ежектованому потоці нижче за течією, вихрову камеру вище за течією, і дві гострі кромки, одна в місці входу ежектованого потоку у вихрову камеру, і друга в місці виходу потоку в сталий потік у пограничному шарі. Друга гостра кромка може бути замінена поверхнею, що має маленький радіус кривизни, щоб полегшити виготовлення і посилити міцність цього компонента, без втрат в ефективності.

Фіг.1 - це схемне рішення базисного ежектуючого елемента системи ежекції. Воно включає сопло (13), що підготовлює добавку, вихрову камеру (4) на верхній за течією стороні елемента, яка має форму і розмір, визначені двома радіусами (1) і (2), гостру кромку (3), де перетинаються вихрова камера (4) і ежектований потік (5), або гостру кромку, або поверхню, що має радіус кривизни (6) досить великий, щоб діяти як поверхня Коанда в місці, де вихрова камера (4) і зовнішня стінка (7) перетинаються, поверхню Коанда (8) радіуса (9) на нижній по потоку стороні ежектера, яка з'єднується з зовнішньою стінкою (10), і щілина (11), через яку ежектований потік (5) приєднується до сталого потоку в пограничному шарі (12). У випадках, коли є обмеження на геометрію ежектера, поверхня Коанда (8) може мати складений радіус замість фіксованого радіуса. У вході ежектера знаходиться сопло (13) чи інший пристрій, що генерує конвекгентний потік, який переходить у ежектований потік (5). Ежектований потік має ширину h_1 . Призначення сопла полягає в тому, щоб установити ламінарний потік, що звужується, достатній для того, щоб розмотати, вирівняти і розтягти молекули добавки до такого стану, коли вони ефективні. Потік через ежектер буде ламінарним, оскільки швидкість ежекції повинна складати приблизно десять відсотків від швидкості вільного потоку, і ежектер повинний бути такого розміру, щоб давати масову витрату в $10Q_0$. Масова витрата може мінятися приблизно в два рази, більше чи менше, і буде залежати від довжини і властивостей (наприклад, шорсткості і в'язкопружних властивостей) стінки, швидкості вільного потоку, типу і концентрації добавки, і рівня бажаного зниження опору. Діапазон цих параметрів для зазвичай використовуваних добавок приведе до ламінарного потоку через ежектер. Швидкість ежектованого потоку рідини обмежена низу значенням, достатнім для того, щоб ежектований потік залишався приєднаним до поверхні Коанда (8). Звернувши увагу на обмеження швидкістю пристінного потоку в пограничному шарі, витиснутого ежектованим потоком. Якщо не перевищувати цю швидкість, два потоки можуть з'єднуватися без значного збільшення локального рівня турбулентності. Необхідна масова витрата і швидкість ежекції визначають ширину сопла чи щілини h_1 . Якщо використовувати добре конфігуроване сопло, добавка буде ефективна відразу після об'єднання з пограничним шаром і почне впливати на рівень турбулентності, що є головним механізмом дифузії в турбулентному пограничному шарі. Концентрація добавки, звичайно, найбільша в місці ежекції. Таким

чином, зменшення рівня турбулентності в цьому місці є критичним для керування дифузійною і максимізацією ефективності ежектованої кількості добавки. Як описано в літературі, було показано, що сопло з довжиною порядку десяти міліметрів і кутом між стінками сопла приблизно від 10 до 45 градусів є адекватним для підготовки добавки при середніх витратах через сопло в приблизно один метр за секунду для полімерів типу Polyox WSR-301.

Як описано нижче, поверхня Коанда і вихрова камера працюють як єдиний модуль. Призначення поверхні Коанда полягає в тому, щоб зберегти ежектований потік приєднаним до зовнішньої стінки нижче по потоку. Коли ежектується полімерна добавка, радіус поверхні Коанда (9) повинен бути близько $4h_1$. Усунення області відриву на нижній по потоку кромці ежектора дозволяє уникнути нестійкості, внесеної таким відривом, і яка властива традиційним моделям щілини.

Компонента швидкості ежектованого потоку, нормальна до пограничного шару, зменшується майже до нуля внаслідок поверхні Коанда і низької масової витрати. Усуваючи "зметення" пограничного шару, можна уникнути збільшення опору тиску і швидкої дифузії ежектованої добавки, зв'язаних з цим явищем.

Призначення вихрової камери, розміщеної на верхній по потоку стороні ежектора, полягає в тому, щоб зменшити чи усунути джерела завихреності, що інакше сприяла б руйнуванню сталого пограничного шару, тим самим збільшуючи локальний опір і підсилюючи швидкість дифузії добавки в пограничному шарі. Форма камери визначається двома радіусами, (1) і (2). Центром для (1) є кінчик гострої кромки (3), величина (1) дорівнює приблизно $4h_1$. Центр (2) - середина лінії, побудованої від гострої кромки (3) до протилежної стінки камери. Якщо (2) - половина довжини (1), дві криві будуть давати неперервну поверхню. Хоча таке відношення 2:1 не обов'язково повинно бути точним, відхилення від нього вимагають короткого сегмента стінки, щоб уникнути будь-якого розриву чи точки перегину в профілі камери. Верхня частина камери утворена прямою, що з'єднує гостру кромку (6) з поверхнею, утвореною (1). Як згадано вище, гостра кромка в (6) може бути замінена маленькою вигнутою поверхнею, щоб полегшити виготовлення і збільшити міцність стінки. Якщо кривизна є достатньою для того, щоб зберегти приєднаний потік до місця його з'єднання з вільним потоком, ефективність ежекції не буде знижуватися. Для параметрів, які застосовуються у морській техніці в повному масштабі, радіус цієї кривої повинен бути близько $0.5h_1$, з центром на зовнішній стінці, так що розмір щілини (11) у бік сталого пограничного шару (12) дорівнює близько $3h_1$.

Присутність внутрішньої вихрової камери на верхній за течією стінці змінює поведінку потоку в порівнянні з потоком у вигнутому каналі й усуває вихори, внесені інакше кривизною стінки вище за течією. Ні вихри Діна, ні вихри Гертлера не формуються. Рух ежектованого потоку індукує циркуляцію у вихровій камері. При належним чином обраних формі і розмірах камери, усередині її формується стійкий вихор. Пограничний шар на верхній за течією границі ежектованого потоку не розвивається далі. Замість цього, завихреність, генерована внутрішньою верхньою за течією стінкою камери, дисипується вихром, який знаходиться у камері. Профіль швидкості ежектованого потоку змінюється в порівнянні зі сталим потоком у каналі таким чином, що потік уздовж верхньої за течією кромки внутрішнього потоку сповільнюється менше, ніж без вихрової камери, тим самим забезпечується більш стійкий шар ежектованої рідини, коли вона з'єднується з пристінною областю сталого пограничного шару. Отже, зменшується нестійкість, внесена в пограничний шар на верхній за течією кромці ежектованого потоку.

При відсутності вихрової камери кривизна, необхідна для формування поверхні Коанда, могла б приводити до генерації вихрів типу вихрів Гертлера (над увгнутою стінкою) чи вихрів Діна (у вигнутому каналі). Отже, вплив поверхні Коанда на процес ежекції поліпшується, оскільки завихреність на верхній за течією кромці внутрішнього каналу розсіюється вихровою камерою. Також, підготовка добавки потоком через сопло, що звужується, ініціює знижуючу опір дію добавки. Зокрема, ця дія включає розсіювання дрібномасштабної завихреності. Ці окремі механізми працюють разом, поліпшуючи поведінку ежектованого потоку, коли він з'єднується зі сталим пограничним шаром.

Комбінування поліпшеної поведінки ежектованого потоку з підготовкою добавок під час процесу ежекції приводить до більш швидкого придушення турбулентності і, отже, зменшення дифузії концентрованої добавки. У даному винаході, дифузія концентрованої добавки далі зменшується попередньою обробкою потоку безпосередньо вище за течією від головного ежектора. Кілька методів можуть бути використані. Для нестійких чи складних турбулентних потоків в пограничному шарі представлений винахід включає окремий, витратний, ежектор добавок, який конфігуровано так, щоб викидати низько концентровану добавку, і розміщений безпосередньо вище за течією від головного ежектора. Концентрація може бути порядку 10 частин на мільйон по вазі 18 (wppm), тому що задача не в тому, щоб одержати ефект далеко вниз по потоку, а тільки безпосередньо вище по потоку й у тім місці, де концентрація речовини з головного ежектора найбільша (тобто, де втрати через дифузійну найбільші). Таким чином, за рахунок (тобто, витрачаючи) невеликої кількості добавки набагато більша кількість добавки з головного ежектора залишиться в пристінній області.

Для відносно стійких потоків, вище за течією від головного ежектора встановлюються більш прості ежектори, конфігуровані як поперечні поглиблення, із розмірами, придатними для створення стійкого захопленого вихру чи системи вихрів. Система стійких захоплених вихрів буде дисипувати дрібномасштабну завихреність, генеровану стінкою, і переривати розвиток пограничного шару вище за течією. У літературі опубліковані профілі поглиблення, що формують стійкі захоплені вихори, зокрема для керування відривом за тілом. На додаток до правильно профільованих поглиблень, даний винахід пропонує маленькі кількості добавок, щоб додатково сприяти стабілізації захопленого вихра.

Три типи конфігурації поглиблення вище за течією дані на Фіг.2. Фіг.2A - це схема поперечного поглиблення з перерізом еліптичної форми з головною віссю (15), малою поперечною віссю (16), і глибиною (17), відносно зовнішньої стінки. Ця форма, якщо правильно побудована ($15 > 17$), може бути більш прийнятна при низьких рівнях нестійкості в пограничному шарі, ніж прямокутна форма. Фіг.2B - це схема перерізу прямокутного поглиблення ширини (18) і глибини (17) (де $17 = 18$), яке може бути наповнено добавкою через сопло (19) з поверхнею Коанда (20) у донному нижньому по потоку куті поглиблення. Для цієї конфігурації введення маленьких кількостей добавки збільшить стійкість захопленого вихру. Фіг.2C - це схема перерізу подібного прямокутного поглиблення, яке може бути наповнено добавкою через сопло (21)

на верхній за течією кромці поглиблення. Для такої конфігурації додаткова витрата добавки буде не набагато більше, ніж для конфігурації на Фіг.2В, але добавка придушить дрібномасштабну завихреність у пристінній області, а також стабілізує захоплений вихор. В усіх випадках зовнішній потік (12) спрямований зліва направо.

На додаток до цих методів, можливо також підготовлювати потік вище за течією, використовуючи інші методи зменшення опору безпосередньо вище за течією від головного ежектора. Ці методи включають, але не обмежуються, ріблети, що знижують опір покриття різних типів, і відсмоктування пограничного шару. Як описано в літературі, кожний має переваги в залежності від характеристик вище за течією.

Тому що ежектор дійсного винаходу є набагато менш руйнівним, ніж попередні проекти ежектора, стає можливим стратифікувати різні добавки, використовуючи тандемні ежектори. Ежекція рідин з різною в'язкістю через множинні ежектори дозволяє одержувати сприятливий градієнт в'язкості в пристінній області, у такий спосіб підвищуючи ефективність системи. Наприклад, ежекція рідини з подібного, але меншого ежектора, розміщеного безпосередньо нижче за течією від головного ежектора, і з такими розмірами, щоб значення Q_e приблизно дорівнювало одиниці, буде відтискувати добавку з ежектора вище по потоку від стінки в область, де вона ефективна для зниження рівня турбулентності. У випадку використання газових мікробульбашок, це також знижує здатність бульбашок діяти на стінку як елементи шорсткості під час ежекції. І для газів, і для концентрованих розчинів полімеру, це може забезпечувати сприятливий градієнт в'язкості на стінці замість несприятливого. Ежектована рідина може бути чистим розчинником, наприклад, водою, чи розведеним розчином добавки, в'язкість якого така ж або менша (як для нагрітої води), ніж у навколишнього розчинника. Якщо використовується тільки вода, або ніякої добавки не використовується в ежекторі вниз по потоку, вимоги до сопла можуть бути ослаблені. Тому що витрата через ежектор нижче по потоку зменшується до приблизно одного Q_e , швидкість ежекції повинна дорівнювати приблизно п'ятому відсоткам від швидкості вільного потоку. Це приблизно половина швидкості ежекції більшого ежектора вище за течією. Щоб пристосуватися до більш низької швидкості ежекції, відношення діаметра поверхні Коанда до ширини щілини повинне збільшитися в порівнянні з таким для ежектора вище за течією до значення від 6 до 8 ширин щілини (26), для того, щоб усунути локальний відрив на цій поверхні. Розмір щілини (11) повинен залишитися приблизно в 3 рази більшим щілини (26); отже, сегмент між вигнутою стінкою камери і кромкою (6) має бути розширений у порівнянні з ежектором вище за течією.

Фіг.3 - це схема поперечного перерізу однієї з конфігурацій потрібної системи ежектора. У цій конфігурації еліптичне поперечне поглиблення (22) розміщено вище по потоку від першого головного ежектора (23). Добавка може подаватися в еліптичне поглиблення тим же способом, що зображений на Фіг.2В чи Фіг.2С. У залежності від характеру течії вище по потоку, можуть бути розміщені додаткові поглиблення (25), щоб придушити рівень турбулентності біля першого головного ежектора. Або, як показано на Фіг.4, замість поглиблень можна помістити маленький витратний ежектор 29, такого розміру, щоб давати від 5 до $10Q_e$ добавки при концентрації порядку $10 w_{ppm}$ для придушення рівня турбулентності на першому головному ежекторі. Або, витратний ежектор може бути поглибленням (25), як показано на Фіг.3, що має п'ятий рідинний вхід через сопло (21) у верхньому краї поглиблення вище по потоку, подібно розташуванню, показаному на Фіг.2С. Жертвуючи цією маленькою кількістю добавки, ми зменшимо рівень турбулентності і, таким чином, дифузію на першому головному ежекторі.

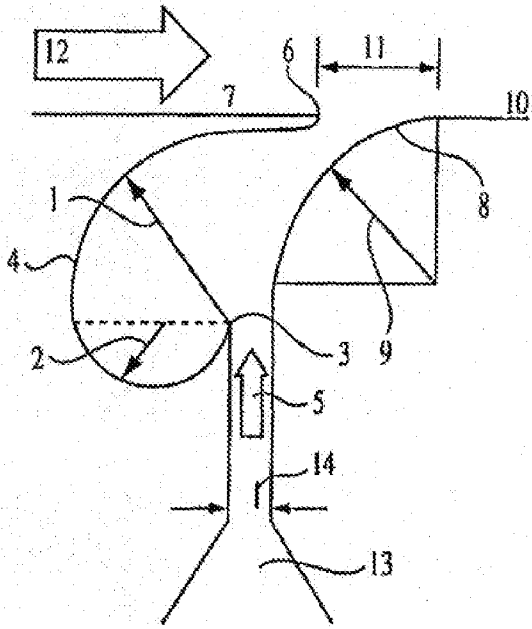
Рідина f_1 з першого головного ежектора може бути сумішшю газових мікробульбашок, що, відповідно до літератури (див. Merkle і Deutsch, наприклад), може бути ефективною в межах 300 в'язких довжин, тобто далі від стінки, ніж більшість полімерів. Deutsch також повідомляє, що шар мікробульбашок, очевидно, екранує пристінний шар від великих структур у зовнішніх областях пограничного шару. Таким чином, множинні тандемні ежектори (23) і (4) можуть використовуватися, щоб розмістити мікробульбашки різних масштабів і полімери з різною молекулярною вагою і конфігурацією в тому шарі, де вони ефективні. Нижче за течією від головних ежекторів (23 і 4) знаходиться менший ежектор (26), що має ширину щілини h_1 (27), розраховану для масової витрати рідини f_3 , ежектованої з цього ежектора. Якщо з цього ежектора передбачається упорскувати тільки розчинник, наприклад, з метою установалення сприятливого градієнта в'язкості, вимоги до сопла, або подібного пристрою для одержання ламінарного потоку, що звужується, можуть бути ослаблені. Більш того, щоб одержати мікробульбашки потрібного розміру часто використовуються сопла різних конфігурацій; отже, ймовірно будуть потрібні особливі проекти сопла для ежекції мікробульбашок, також як і для попередньої підготовки полімеру до ежекції.

Таким чином, на додаток до зміни реологічних характеристик пристінної рідини, кілька ежекторів можуть використовуватися, щоб стратифікувати добавки, про які відомо, що вони є ефективними у визначених шарах пограничного шару. Наприклад, деякі добавки, типу мікробульбашок визначеного масштабу, вважаються ефективними далі від стінки, ніж полімери. На Фіг.3 набір трьох тандемних ежекторів, кожний розрахований на потрібну масову витрату, міг би забезпечувати триярусний шар, що складається з води (низька в'язкість) f_3 під концентрованим полімеру f_2 , над яким ежектуються мікробульбашки f_4 . Точно так само кілька шарів відповідним чином масштабованих бульбашок, чи кілька шарів різних типів полімерів можуть бути ежектовані з тандемних ежекторів. Над цими рідинами тече добавка з поглиблення вище за течією, або "витратної щілини", f_5 , і рідина вільного потоку f_1 .

У минулому суднобудівники прийшли до висновку, що високі концентрації і великі витрати добавки з одиночного ежектора є більш ефективними, ніж така ж кількість добавки, ежектована з декількох ежекторів, розподілених по довжині корпусу. Збільшення локального опору тертя, викликане традиційними ежекторами, і здування пограничного шару, що веде до збільшення опору тиску, були типові для цього явища. Крім цих ефектів, даний винахід уможливорює використання наборів ежекторів у множинних позиціях уздовж транспортного засобу чи рушія, і в такий спосіб оптимізує розподіл добавки як функцію форми і довжини стінки (транспортного засобу). Таким чином, дуже довгі стінки можуть оброблятися без значної втрати в ефективності.

Ежектори також можуть бути конфігуровані так, щоб підсилити пристінний потік для запобігання відриву при зміні кута атаки вільного потоку, тому що ежектор може адаптуватися до локальних змін в умовах потоку. Процеси після ежекції включають створення таких умов на стінці, щоб зменшити дифузію

добавки нижче за течією від ежектора, обробку зовнішнього потоку для зменшення дифузії добавки й уздовж стінки, і навколо будь-яких виступів, і нижче по потоку від місця ежекції або різних добавок, або різної концентрації добавки, щоб одержати більш раціональну витрату добавки.



Фіг.1

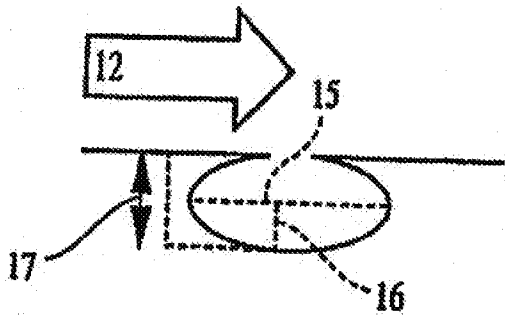


Fig. 2A

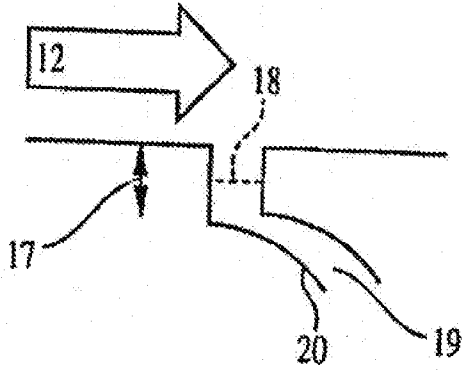


Fig. 2B

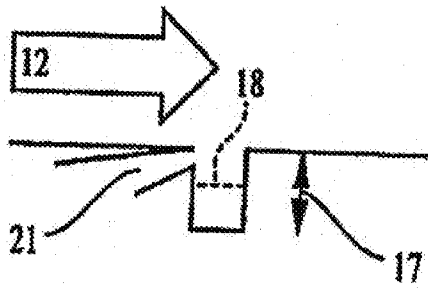


Fig. 2C

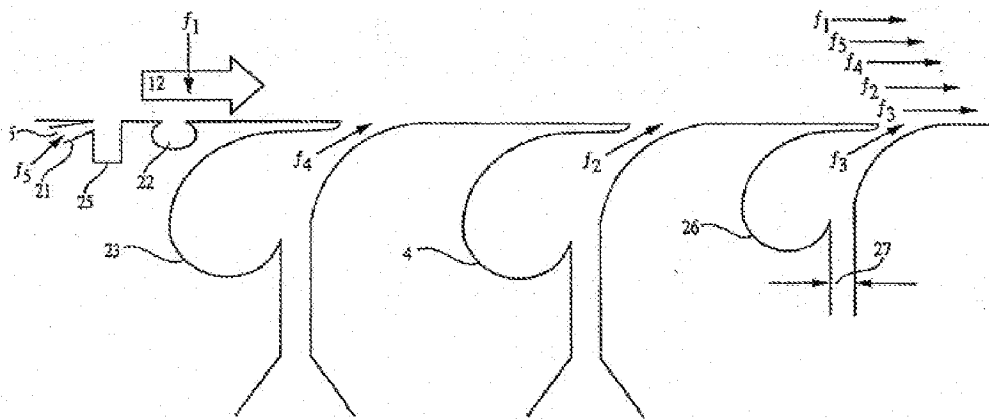


Fig. 3

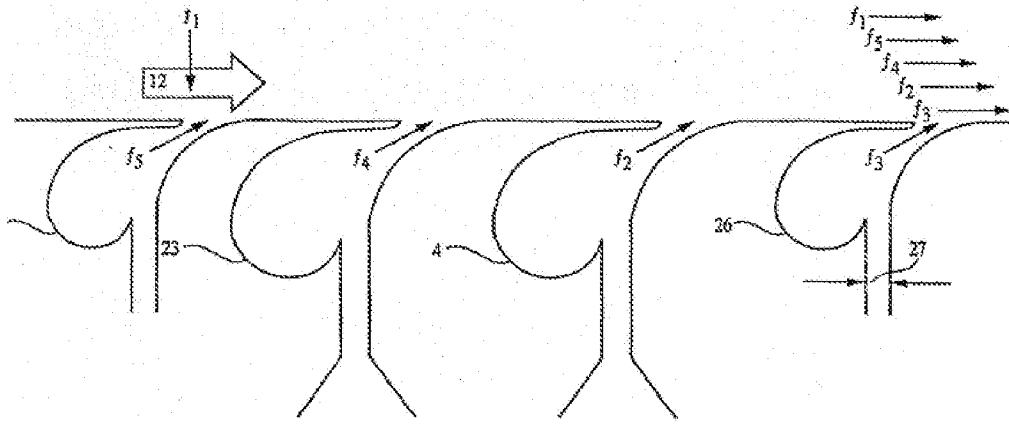


Fig. 4