

УДК 661.96 : 622.276.6

О.В. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного
Национальной академии наук Украины
г. Харьков, e-mail: adm1@ipmach.kharkov.ua*

НОВЫЕ ГИДРОКАВИТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ ЭФФЕКТИВНОГО ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Розглядаються питання розроблення методів і способів фізико-хімічного перетворення вуглеводнів на основі кавітаційних установок. Основну увагу приділено перспективним енергозберігаючим нетрадиційним технологіям, спрямованим на підвищення якості переробки нафтопродуктів.

Problems in developing methods and techniques for physico-chemical conversion of hydrocarbons are discussed based on cavitation installations. The focus is on promising energy-saving nonconventional technologies for improving the quality of processing petroleum products.

В настоящее время во всех развитых странах мира начался настоящий бум в области энергосбережения, использования возобновляемых источников энергии, делаются ставки на новые эффективные топливные технологии, позволяющие экономить природные ресурсы. Важным направлением деятельности в этих областях является создание энергоэффективных технологий повышения глубины переработки добываемых нефтепродуктов, производство и использование альтернативных и искусственных композитных топлив.

Чрезвычайно актуальной для Украины является разработка технологий производства и использования искусственных композитных жидких топлив (ИКЖТ) [1], состоящих из компонентов с различными топливными свойствами. После совместной переработки они дают новый продукт с ценными, практически прогнозируемыми потребительскими характеристиками. Зачастую один из компонентов таких топлив является инициатором горения другого.

Новым технологическим подходом к получению ИКЖТ является гидродинамическое воздействие на обрабатываемую среду. Компоненты будущего композитного топлива проходят стадию предварительного перемешивания, а затем обработку в специальных устройствах – гидровихревых преобразователях и модернизированных роторно-пульсационных аппаратах (РПА), где осуществляется глубокая деструкция, гомогенизация и даже частичное изменение фракционного состава конечного продукта [2, 3]. Для эффективного сжигания ИКЖТ и других горючих смесей в энергетических установках разработаны специальные форсунки – гидровихревые преобразователи [4], которые обеспечивают ультрадисперсное диспергирование, кавитационную обработку топлива и его обогащение воздухом.

В основу технологии получения высококачественных ИКЖТ заложен новый способ получения диспергирования и гомогенизации смеси. Каскадное соединение различных типов (РПА и гидровихревых преобразователей) [2–4] обеспечивает наиболее глубокое диспергирование смеси, вплоть до молекулярного уровня с образованием новых химических соединений. В зависимости от устанавливаемых технологических параметров обработки могут получаться конечные продукты с заданными физико-химическими свойствами [5]. Теоретические положения технологии получения ИКЖТ базируются на результатах численных и экспериментальных

исследований [6, 7], полученных при изучении гидрокавитационного влияния на процессы увеличения глубины переработки нефтепродуктов, в частности мазута.

Технология производства и сжигания искусственного композитного жидкого топлива разрабатывалась с учетом имеющихся местных топливных ресурсов, возобновляемых источников энергии, а также требований по их безотходной утилизации в теплоэнергетических установках. Основой для производства ИКЖТ могут служить водомазутные эмульсии (ВМЭ), водоугольномазутные суспензии (ВУМС), составляющими компонентами которых являются мазуты, бурый уголь, угольная пыль, кубовые остатки, шламы, торф, биоиловые осадки очистных сооружений, отходы птицеферм и животноводческих предприятий.

Гидрокавитационная переработка мазута и приготовление на его основе топлив

Одной из главных задач, стоящих перед нефтеперерабатывающей промышленностью, является увеличение глубины отбора светлых нефтепродуктов, снижение выхода мазута, гудрона, асфальтенов и прочих тяжелых составляющих. Процессы висбрекинга, при помощи которых в настоящее время решаются такие задачи, являются очень энерго- и ресурсоемкими. Необходимо разработать принципиально новые энергоэффективные технологии для внедрения в нефтепереработку.

В отделе нетрадиционных энерготехнологий ИПМаш НАН Украины совместно с ЧП «Планер» создана экспериментальная установка для исследования влияния кавитации в процессе гидродинамической обработки углеводородов и водосодержащих растворов, суспензий и эмульсий.

Работа экспериментальной установки основывается на применении высокоэффективных устройств, реализующих принципы дискретно-импульсного ввода энергии и гидродинамического кавитационного воздействия, к которым относятся, прежде всего, роторно-пульсационные аппараты и гидровихревые или акустические преобразователи. К ним на стадии разработки выдвигаются требования не только получения высококачественных мелкодисперсных эмульсий и суспензий, но и придания им новых потребительских свойств за счет процессов физико-химических преобразований.

Совершенствование таких устройств и разработка на их основе технологий базируется на фундаментальных и прикладных исследованиях в области математического и физического моделирования гидродинамики многокомпонентных потоков в сложнополостных системах [6–10].

Принцип действия установки заключается в том, что поток среды сначала гомогенизируется, а затем подвергается воздействию экстремальных кавитационных полей и практически по всему объёму гидротока обеспечивается диспергирование, а в зонах коллапса кавитационных пузырьков – до молекулярного уровня [2–4].

Интенсификация кавитационных процессов достигается за счёт последовательного воздействия на среду пульсаций давления, микровихрей и кумулятивных струй, сначала в модернизированных (в соответствии с оригинальной методологией авторов) прецизионных РПА, а затем в уникальном гидродинамическом преобразователе с тороидальной камерой расширения [3, 4]. Схематично последовательность кавитационного воздействия на среду представлена на рис.1 в виде кавитационного диспергатора.

Поток обрабатываемой среды подаётся насосом в РПА 1 и 2 (рис. 1), коаксиальные цилиндры которых 5 и 6 (статоры и роторы – по 4 ступени) имеют перфорации (отверстия и препятствия), число которых увеличивается от внутренней пары цилиндров ротора и статора к наружной с соответствующим уменьшением

ширины прорезей. Наличие перфорационных отверстий, их размеры и особенности расположения на коаксиальных цилиндрах роторно-пульсационных аппаратов обеспечивают зарождение кавитационных полей на каждой из четырех ступеней РПА. Величины зазоров между роторами и статорами 30 – 100 мкм, выбраны из условий максимального образования микровихрей, их взаимодействия с радиальными пульсациями и изменяются в зависимости от гидродинамических характеристик обрабатываемой среды.

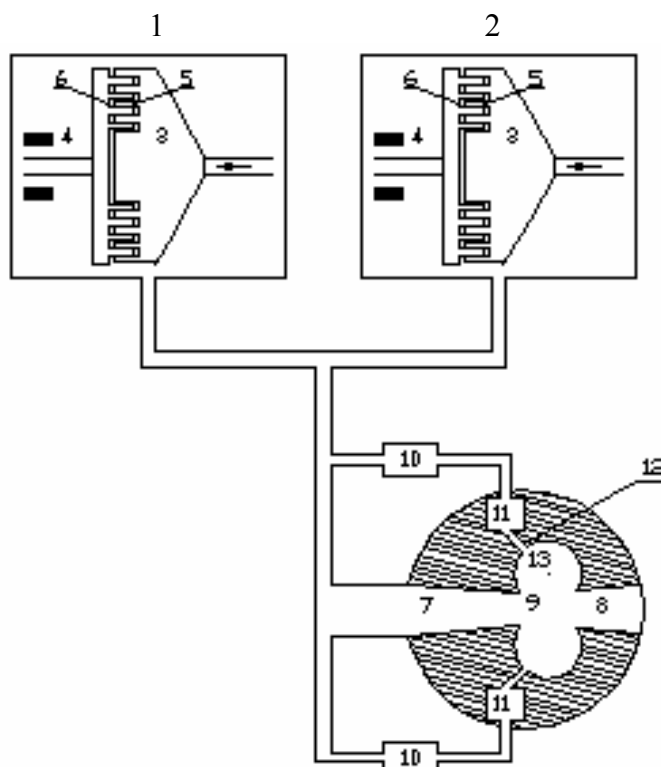


Рис. 1. Схема кавитационного диспергатора

При работе каждого из этих устройств в зазорах между ступенями статора и ротора возникают высокоградиентные течения в сочетании с периодическими радиальными пульсациями, приводящими к резкому изменению направления потока и образованию устойчивых микровихрей и зон кавитации, в центрах которых значительное время (несколько десятков периодов) удерживается обрабатываемая среда в состоянии высокочастотного вращения в направлении вихря.

Физико-химические преобразования с наибольшей эффективностью происходят в зонах коллапса кавитационных пузырьков. Поэтому в первую очередь в гидротоке необходимо организовать развитую пузырьковую кавитацию, причем желательно, чтобы векторы скоростей движения кумулятивных микроструек, образующихся при схлопывании пузырьков, располагались в плоскости, параллельной граням рабочих органов кавитатора.

В данном случае значительная часть энергии, выделяющейся при схлопывании пузырьков, расходуется не на эрозионное разрушение поверхностей устройств, а на целевое воздействие, т.е. на диспергирование потока. При этом увеличивается время схлопывания кавитационного пузырька и возрастает вероятность захвата пузырька в микровихревое образование и его удерживания в зоне реакции.

Для дальнейшей обработки поток поступает в камеру гидроакустической обработки (КГАО) 12, в которой может производиться введение нового жидкого или газообразного компонента смеси и осуществляется дальнейшее диспергирование, гомогенизация с образованием новых химических соединений. Проточная часть КГАО представляет собой осесимметричный канал, на входе которого конфузор 7, 9, на выходе – диффузор 8, в средней части канала расположена тороидальная вихревая камера смешения 13 (рис. 1). За счет того, что в камере 13 при движении потока жидкости в канале происходит разряжение, через эжекционные отверстия 12, из дополнительной кольцевой камеры 11 затягивается необходимый для смешения второй компонент топлива. Эжекционные каналы 12 выводятся в зону разряжения тороидальной камеры 13. Эжектируемый поток, который затягивается из камеры 11, делится на m отдельных ортогональных потоков. Каждый из m потоков подвержен воздействию крутильных моментов, которые создаются за счёт геометрической формы эжекционных отверстий. Количество эжекционных каналов m , геометрия и месторасположение каналов в конструкции также определяются по оригинальной методике, разработанной авторами [4].

В результате двойной кавитационной обработки среды снижаются ограничения на прохождение химических реакций, связанные с наличием межфазных границ, обрабатываемый поток доводится до уровня ультрадисперсии, частично – молекулярной, при которой предварительно несмешиваемые субстанции после кавитационного воздействия становятся условно сорастворимыми на молекулярном уровне.

Вода под воздействием кавитационных полей диссоциирует на ионы H^+ и OH^- и обеспечивает протекание химических процессов распада и синтеза углеводов. Происходит процесс гидрогенизации органических соединений с участием ионов H^+ , генерируемых непрерывно, после чего среда приобретает сильнощелочные свойства. В результате продуктом реакций являются остатки высокомолекулярных кислот, которые не вступают во взаимодействие со спиртами. Реакции становятся необратимыми, идет образование спиртов, накопление которых улучшает свойства целевого продукта.

Поддержание концентрации воды в органической среде осуществляется порционным увеличением доли воды по мере образования более легких фракций и увеличения характерной для нефти мольной концентрации – $H/C > 2,5$. На этой стадии взаимодействие рабочих органов РПА приводит к увеличению диссипативной энергии системы с интенсивным смешиванием, эффективным диспергированием и гомогенизацией смеси, однако завершения процесса обработки и расслоения фракций не происходит, т.к. не удастся эффективно диссоциировать всю воду для осуществления полной переработки мазутной смеси.

Для получения тонкодисперсной фракции с эффективной диссоциацией воды на ионы H^+ , OH^- и высоким содержанием газовой фазы сырье проходит следующий этап обработки в КГАО, что принципиально важно для процессов гидрогенизации и гидролиза органических веществ.

На рис. 2 представлена схема лабораторной установки, на которой проводились исследования по гидрокавитационному преобразованию тяжелых углеводов и получению ИКЖТ.

Подача исходного сырья из резервуара 19 в систему кавитационных камер 1 и 2 производится при помощи насоса 15. Предварительная подготовка среды осуществляется в стандартном роторно-пульсационном аппарате 14. После обработки в РПА поток устремляется в КГАО, а затем в реактор 16, в котором расположен теплообменник, поддерживающий температуру обрабатываемой среды на требуемом

уровне. Из реактора обрабатываемая среда поступает либо на слив, либо обратно в цикл.

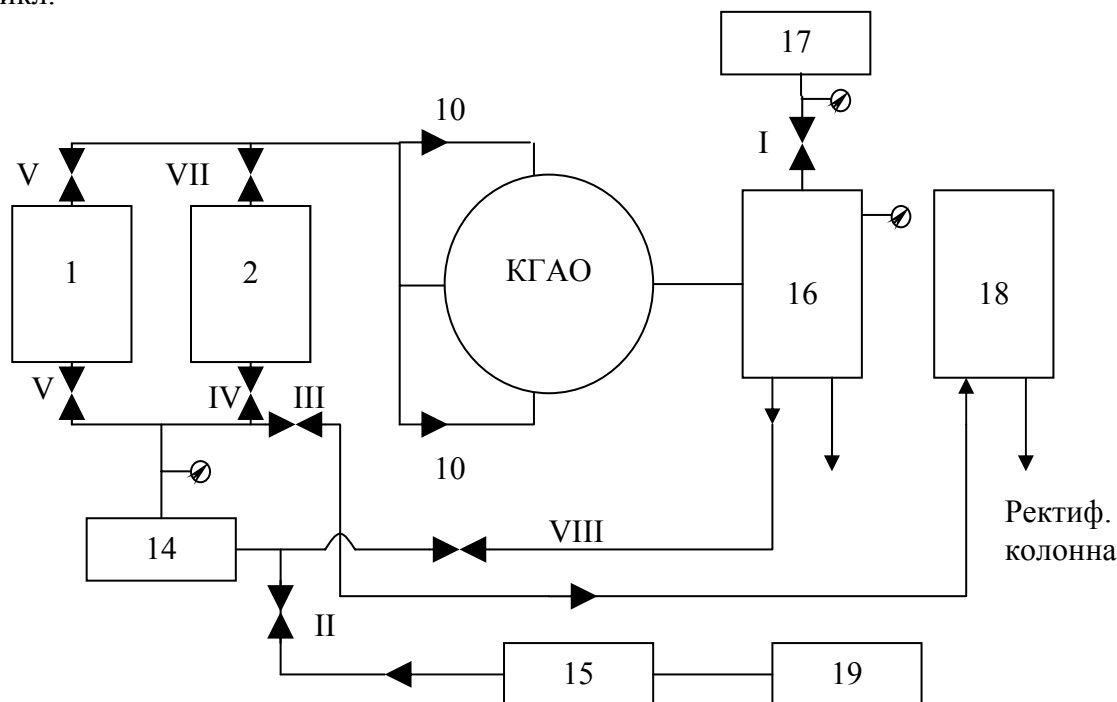


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Из емкости 17 может производиться добавка исходного сырья или дозированная подача воды. После охлаждения и фильтрации (позиция 18) обработанная жидкость, очищенная от серосодержащих соединений, остаточной влаги, сливается для проведения дальнейших исследований свойств полученного топлива. В промышленном цикле предполагается, что полученное сырье может направляться на ректификационную колонну для дальнейшего выделения дистиллятных фракций.

По всему тракту экспериментального стенда установлены средства измерения температуры, давления. При помощи кранов, задвижек и дросселей, а также варьирования скоростей вращения роторов насосов и РПА имеется возможность проведения исследования процессов обработки эмульсий и суспензий в широком диапазоне изменения тепловых и гидравлических параметров установки.

Результаты проведения экспериментов

На лабораторной установке осуществляли экспериментальные исследования по переработке мазута. Обработку проводили при температуре 50–84 °С и атмосферном давлении в зоне вихрепотоковой обработки. В зоне кавитационной и вихрепотоковой обработок происходило порционное смешивание мазута с водой до 25 % (об) и в соотношении 1:4 с прямогонным бензином.

Исходное обрабатываемое сырье (рис. 2) из емкости насосом 15 при открытой электрозадвижке по трубопроводу подавали с помощью задающего роторно-пульсационного аппарата 14. Распределенный поток при открытых электрозадвижках V и IV поступал в камеры 1 и 2 и через дроссели 10 – в камеру гидроакустической обработки. После заполнения обрабатываемым потоком рабочего контура задвижки закрывали и осуществляли кавитационную обработку.

Переработка мазута с целью получения дистиллятных фракций проводилась на исследовательской установке по следующей схеме: из 100 % смеси 20 % составлял мазут. К нему добавлялось 80 % прямогонного бензина по отношению к мазуту. В дополнение к 20 % мазута и 80 % бензина добавлялась вода в количестве 25 % по отношению к мазуту. Обработка смеси проводилась до 80 °С. Плотность смеси составляла 0,837175 г/см³. Результаты термической фракционной разгонки обработанной смеси представлены ниже.

Фракционный состав обработанной смеси

| | |
|---------|--------|
| Н.к. | 93 °С |
| 10 % | 120 °С |
| 20 % | 137 °С |
| 30 % | 154 °С |
| 40 % | 175 °С |
| 50 % | 209 °С |
| 60 % | 251 °С |
| 70 % | 314 °С |
| 80 % | 335 °С |
| 90 % | 320 °С |
| К.к. | 261 °С |
| Выход | 94 % |
| Остаток | 5 % |
| Потери | 1 % |

Температура вспышки в закрытом тигле 14 °С

Результат указывает на практически полную переработку мазута в среде прямогонного бензина с образованием в основном бензиновой фракции и дизельного топлива.

Переработка мазута также осуществлялась в среде дизельного топлива с 20 % добавкой прямогонного бензина. Результаты фракционной разгонки представлены ниже.

| Исходный состав | | После кавитационной обработки | |
|--|--------------------------|--|--------|
| Н.к. | 91 °С | Н.к. | 53 °С |
| 10 % | 114 °С | 10 % | 79 °С |
| 20 % | 131 °С | 20 % | 95 °С |
| 30 % | 149 °С | 30 % | 108 °С |
| 40 % | 166 °С | 40 % | 131 °С |
| 50 % | 214 °С | 50 % | 187 °С |
| 60 % | 278 °С | 60 % | 266 °С |
| 64 % | 295 °С | 70 % | 330 °С |
| 65 % | 294 °С начало коксования | 82 % | 358 °С |
| ρ | 0,7550 г/см ² | К.к. | 353 °С |
| Температура вспышки в закрытом тигле 18 °С | | Выход | 90 % |
| | | ρ | 0,763 |
| | | Температура вспышки в закрытом тигле 22,5 °С | |

Несмотря на то, что переработка мазута осуществлялась в основном в дизельном топливе, из 35 % мазута исходного образца где, в дистиллятные фракции перешло более 25 % мазута.

Выходные фракции исследовались методами оптической электронно-растровой и электронно-просвечивающей микроскопии [5].

Наибольшая эффективность переработки мазута путем кавитационного воздействия достигалась в составе: мазут 40 л, прямогонный бензин 2,8 л, вода 8 л. Переработка мазута выполнена в три этапа. Вышеуказанный состав обрабатывался 15 мин. Затем добавлялось 8 л воды, а продолжительность дополнительной переработки составляла 5 мин. После этого добавлялось еще 8 л воды, время обработки доводилось до 25 мин.

В результате фракционной разгонки из состава водомазутной суспензии выделено до 40 % бензина, т.е. из каждого литра мазута может быть получен литр бензина. Образцы мазута после кавитационной обработки обладают свойствами, приведенными в табл.1.

Таблица 1. Мазут после кавитационной обработки

| Состав и свойства | Образец 1 | Образец 2 |
|--|-----------|-----------|
| Массовая доля воды, %, не более | 50 | 42,5 |
| Теплота сгорания (низкая) в пересчете на сухое топливо, кДж/кг | 9420 | 9370 |
| Теплота сгорания рабочая, кДж/кг | 9480 | 5350 |

Следует ожидать сохранения производительности теплогенерирующего оборудования при использовании водомазутных эмульсий, полученных в результате обработки в лабораторной установке. Оптимальное содержание воды должно определяться в каждом конкретном случае с учетом особенностей конструкции камер сгорания и теплообменных аппаратов.

Выводы

Необходимость замещения импортируемого природного газа другими видами энергоносителей в настоящее время возродила интерес к сжиганию твердого топлива, водотопливных эмульсий и комбинированных видов горючего. Стала целесообразной добыча и сжигание низкокачественных углей; в качестве альтернативы жидкого топлива рассматриваются многие другие виды: торф, биоил, отходы древесины, солома, отходы сахарного тростника, а также сланцевые масла, которые до их сжигания необходимо выделить из сырых сланцев. Современное название таких видов топлив – искусственные композитные жидкие топлива [1]. Для экономичного сжигания этих разнородных топлив, часть от которых можно отнести к «трудным», необходимо точное знание содержания в них горючих и негорючих составляющих. Наиболее существенными характеристиками топлива, определяющими его цену, являются влажность, зольность, содержание связанного углерода и выход летучих веществ.

С точки зрения физико-химических основ взаимодействия, диспергирование до молекулярного уровня и кавитационное расщепление органических молекул, а также разработка способов их практической реализации предопределяют широкие и неожиданные возможности, до сих пор недостижимые в современных технологиях:

управляемый и дешёвый крекинг нефти с наперёд заданным содержанием определённых фракций, существенное увеличение глубины её переработки, управляемая модификация топлив, создание альтернативных топлив, очистка нефти и нефтепродуктов, ускоренная очистка и аэродегазация воды без применения громоздкого и сложного оборудования, а также безреагентное увеличение рН воды (в том числе подземных источников), создание новых материалов, широкое использование в пищевой и перерабатывающей отраслях и многое другое.

Литература

1. *Кравченко О. В.* Нетрадиционные энерготехнологии эффективного получения и использования искусственных композитных жидких топлив / О. В. Кравченко И. Г. Суворова, Я. В. Смирнов, С. С. Холобцев // *Авиац.-косм. техника и технология. Научно-технический журнал НАУ «ХАИ».* – Харьков, 2006. – № 10(36). – с. 91–97.
2. Заявка № 200500188 МПК⁷ C10 G15/00, 15/08 (UA). Способ кавитационной гидрогенизации и гидролиза углеводов и устройство для его осуществления / И. И. Мирошниченко, Ю. М. Мацевитый, И. И. Мирошниченко, О. В. Кравченко, А. А. Тарелин. – Приоритет 10.01.05.
3. Заявка № 2005 10753 Украина, МПК⁷ B01F 7/00, C 10 G 7/06. Спосіб переробки мазуту та роторно-кавітаційний диспергатор для його здійснення / І. І. Мирошниченко, І. Г. Суворова, Ю. М. Мацевитий, О. В. Кравченко, А. О. Тарелін, І. І. Мірошниченко (Україна). – Заявл. 14.11.05.
4. Пат. на корисну модель № 18922, Україна, МПК⁷ B01F 3/08, B 63 B59/00/ «Змішувач-форсунка» / І. Г. Суворова (Україна), О. В. Кравченко (Україна); Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України. – №U 2006 06857; Заяв. 19.06.2006; Опубл. 15.11.06, Бюл. № 11. – 4 с.
5. *Бастеев А. В.* Принцип активации и его применение в процессах энергопреобразования // *Пробл. машиностроения.* – 1993.–Вып. 39.– с. 81–87.
6. *Суворова И. Г.* Компьютерное моделирование осесимметричных течений жидкости в каналах сложной формы // *Вестн. НТУ ХПИ.* – Харьков, 2004. – № 31. – с. 141–148.
7. *Суворова И. Г.* Математическое моделирование потока жидкости методом R-функций / И. Г. Суворова, О. В. Кравченко // *Системні технології. Регіон. міжвуз. зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 4 (45). – с. 57 – 69.
8. *Суворова И. Г.* Автоматизация расчетов методом R-функций применительно к задачам стройиндустрии: Учеб. пособие / И. Г. Суворова, А. Н. Шевченко – Киев: Учеб.–метод. каб. высшего образования, 1991. – 60 с.
9. *Рвачев В. Л.* Численная реализация задачи о течении вязкой жидкости методом R-функций в системе ПОЛЕ-3 / В. Л. Рвачёв, И. Г. Суворова, Т. И. Шейко // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* – Львов, 1991. – № 33. – с. 95–99.
10. *Суворова И. Г.* Математическое и компьютерное моделирование в гидродинамических сложнополостных системах / И. Г. Суворова, С. С. Холобцев // *Вест. НТУ ХПИ.* – Харьков, 2006. – № 32. – с. 137–148.