УДК 629.7.015.7

О.В. СОЛОВЬЕВ, канд. техн. наук, доцент, **В.Н. КОБРИН,** докт. техн. наук, профессор,
С.М. ЕРЕМЕНКО, канд. техн. наук, доцент, **Н.В. КОБРИНА,** канд. техн. наук, доцент
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»
(НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»), г. Харьков
О.А. ТРУХМАЕВ, директор
ОАО «Азовавтострой», г. Мариуполь (Донецкая обл.)

РАСПЫЛЕНИЕ БИОДЕСТРУКТОРОВ ВБЛИЗИ ПЛОСКОСТИ РАЗДЕЛА СРЕД ПРИ ПОМОЩИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В нестационарной нелинейной постановке рассмотрена математическая модель расчета обтекания летательного аппарата вблизи твердой плоскости раздела сред. Математическое моделирование и расчет аэродинамических характеристик летательных аппаратов с учетом плоскости раздела сред способствуют принятию верных конструкторских решений в процессе проектирования перспективных летательных аппаратов.

Ключевые слова: математическая модель, беспилотные летательные аппараты, распыление биодеструкторов.

Наиболее распространенные технологии ликвидации нефтяных загрязнений поверхностных вод базируются на применении боновых заграждений, которые ограничивают распространение нефтепродуктов и позволяют проводить их сбор с помощью различных механических средств. Однако эти технологии требуют значительных затрат времени и материалов и при этом не обеспечивают полной очистки загрязненных зон (в частности, акваторий Азовского и Черного морей) от нефтяных разливов [1].

Для более тщательной очистки акваторий применяют различные сорбенты – органические, неорганические и синтетические. Наиболее перспективными считаются биологические сорбенты нефти, обеспечивающие биодеструкцию углеводородов специализированными штаммами микроорганизмов.

Важнейшим условием успешной ликвидации аварийного разлива нефти является максимально быстрое обнаружение загрязненного пятна и его покрытие слоем биодеструктора. Существующие в настоящее время технические устройства [1, 2] не обеспечивают оперативного распыления сорбентов на большие расстояния. Как показывает практика, метод распыления сорбентов с вертолета в потоке воздуха, создаваемого вертолетным винтом, не является эффективным ввиду отсутствия направленной прицельности, ветрового сноса до 90 % распыляемого вещества и его неравномерного распределения по загрязненной нефтепродуктами площади. Любые технологические изменения при модернизации распылительной техники для достижения большего радиуса покрытия загрязненной площади приводят к многократному увеличению веса, технической сложности и стоимости распылителей [3].

Своевременную ликвидацию последствий аварийного разлива нефтепродуктов можно обеспечить применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Большая дальность полета в сочетании с малыми размерами БПЛА, его высокой маневренностью и эксплуатационной технологичностью позволяют с помощью специального оборудования оперативно выявлять загрязнения, доставлять сорбент к местам разлива и обеспечивать покрытие им нефтяного пятна. Варьируя высоту полета над пятном, можно исключить ветровой снос сорбента и добиться необходимой плотности покрытия загрязненного участка.

Эффективность распыления биодеструкторов с помощью БПЛА зависит от точности определения областей, где эти деструкторы осядут. Для решения задачи о поведении концевых вихрей, стекающих с крыла беспилотного летательного аппарата и формирующих зону покрытия пятна загрязнения, рассмотрим математическую модель обтекания БПЛА в нестационарной нелинейной постановке вблизи твердой плоскости раздела сред (поверхности земли) при распылении биодеструкторов.

Задача об обтекании летательного аппарата рассматривается как задача Неймана для уравнения Лапласа [4, 5]. Решим уравнение Лапласа

$$\Delta\Phi(\vec{r},t)=0,\ \vec{r}\notin S\cup\sigma, \quad (1)$$

где $\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$, относительно потенциала скорости $\Phi(\vec{r},t)$ со следующими граничными условиями:

- условие непротекания на поверхности S:

$$\vec{\nabla}\Phi(\vec{r},t)\cdot\vec{n}(\vec{r},t)=\vec{V}_a(\vec{r},t)\cdot\vec{n}(\vec{r},t),\ \vec{r}\in S, \quad (2)$$

где $\vec{n}(\vec{r},t)$ – внешние нормали к поверхности S;

- условие убывания возмущений на бесконечном удалении от поверхностей S, σ:

$$\left|\vec{\nabla}\Phi(\vec{r},t)\right|\to 0,\ \left|\Phi(\vec{r},t)\right|\to 0,\ \left|\vec{r}\right|\to\infty; \quad (3)$$

- кинематическое условие совместности течений и условие отсутствия перепада давлений Δp на поверхности σ:

$$\left(\vec{V}_a(\vec{r},t)\cdot n(\vec{r},t)\right)_+=\left(\vec{V}_a(\vec{r},t)\cdot n(\vec{r},t)\right)_-,$$

$$p(\vec{r},t)_+=p(\vec{r},t)_-,\ \vec{r}\in\sigma; \quad (4)$$

- условие Чаплыгина – Жуковского – Кутта о конечности скорости на линиях L:

$$p(\vec{r},t)_+=p(\vec{r},t)_-,\ \vec{\nabla}\Phi\cdot n(\vec{r},t)_+=\vec{\nabla}\Phi\cdot n(\vec{r},t)_-,\ \vec{r}\in L. \quad (5)$$

Решение уравнения (1) заключается в определении потенциала двойного слоя $\varphi(\vec{r},t)$, распределенного по поверхностям S и σ с плотностью $g(\vec{r},t)$ $(\vec{r}\in S,\sigma)$:

$$\varphi_S(\vec{r},t)=\frac{1}{4\pi}\int_S\frac{\partial}{\partial n_S}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_S\right|}\right)g(\vec{r}_S,t)dS,$$

$$\varphi_\sigma(\vec{r},t)=\frac{1}{4\pi}\int_\sigma\frac{\partial}{\partial n_\sigma}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_\sigma\right|}\right)g(\vec{r}_\sigma,t)d\sigma, \quad (6)$$

$$\varphi(\vec{r},t)=\varphi_S(\vec{r},t)+\varphi_\sigma(\vec{r},t),$$

где $\varphi_S(\vec{r},t),\varphi_\sigma(\vec{r},t)$ – потенциалы двойного слоя, распределенные по поверхностям S и σ с плотностями $g(\vec{r}_S,t)$ и $g(\vec{r}_\sigma,t)$ соответственно.

При использовании потенциалов двойного слоя $\varphi_s(\vec{r},t)$ и $\varphi_\sigma(\vec{r},t)$, распределенных по поверхностям S и σ с плотностью $g(\vec{r},t)(\vec{r}\in S,\sigma)$, автоматически выполняется условие (3) убывания возмущений на бесконечном удалении от S и σ. Скорости движения точек поверхности тангенциального разрыва σ определяются дифференциальным уравнением вида

$$\frac{d\vec{r}}{dt}=\vec{V}_a(\vec{r},t),\ \vec{r}\in\sigma.$$

Выполнение условия (2) непротекания на поверхности S летательного аппарата сводит решение системы уравнений (6) к решению двумерного сингулярного интегрального уравнения вида

$$\frac{1}{4\pi}\int_S\frac{\partial}{\partial n}\frac{\partial}{\partial n_S}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_S\right|}\right)g(\vec{r}_S,t)dS=$$

$$=f(\vec{r}_S,t)-\frac{1}{4\pi}\int_\sigma\frac{\partial}{\partial n}\frac{\partial}{\partial n_\sigma}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_\sigma\right|}\right)g(\vec{r}_\sigma,t)d\sigma,\ \vec{r}\in S. \quad (7)$$

Для выполнения граничного условия на твердой поверхности раздела сред $\Sigma_{гр}$

$$\vec{\nabla}\Phi(\vec{r},t)\cdot\vec{n}(\vec{r},t)=\vec{V}_a(\vec{r},t)\cdot\vec{n}(\vec{r},t),\ \vec{r}\in\Sigma_{гр} \quad (8)$$

используем известный метод зеркального отображения [3–6]. Его суть заключается в том, что наряду с поверхностями S и σ с плотностью $g(\vec{r},t)(\vec{r}\in S,\sigma)$ рассматриваются их образы S', σ' с плотностью $g'(\vec{r}',t)=g(\vec{r},t)$ $(\vec{r}'\in S',\sigma')$, полученные симметричным отражением относительно плоскости $O_0X_gZ_g$, совпадающей со срединной плоскостью твердой поверхности $\Sigma_{гр}$ раздела сред (рис. 1) [7, 8].

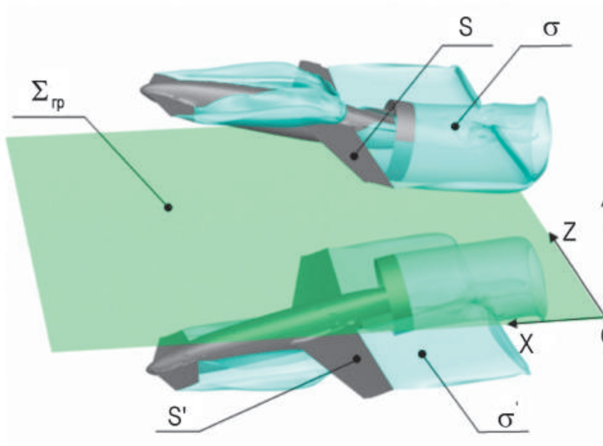

Рисунок 1 – Иллюстрация метода зеркального отображения

Как показано в работе [4], поле возмущенных скоростей над поверхностью раздела сред и вне поверхностей S и σ определяется как суперпозиция полей от поверхностей S и σ и их образов S', σ'. Тогда для потенциала $\varphi(\vec{r},t)$ двойного слоя, распределенного по поверхностям S и σ с плотностью $g(\vec{r},t)$ $(\vec{r}\in S,\sigma)$ и их образам S' и σ' с плотностью $g'(\vec{r}',t)=g(\vec{r},t)$ $(\vec{r}'\in S',\sigma')$, справедливо равенство

$$\varphi(\vec{r},t)=\varphi_S(\vec{r},t)+\varphi_\sigma(\vec{r},t)-\varphi_{S'}(\vec{r},t)-\varphi_{\sigma'}(\vec{r},t), \quad (9)$$

где $\varphi_{S'}(\vec{r},t)$ – потенциал двойного слоя, распределенный по поверхности S' с плотностью $g'(\vec{r}_{S'},t)$, а $\varphi_{\sigma'}(\vec{r},t)$ –

потенциал двойного слоя, распределенный по поверхности σ' с плотностью $g'\left(\vec{r}_{\sigma'},t\right)$. Потенциалы $\varphi_{S'}\left(\vec{r},t\right)$ и $\varphi_{\sigma'}\left(\vec{r},t\right)$ определяются соотношениями, аналогичными (6):

$$\varphi_{S'}\left(\vec{r},t\right)=\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{\partial}{\partial n_{S'}}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_{S'}\right|}\right)g'\left(\vec{r}_{S'},t\right)dS',$$

$$\varphi_{\sigma'}\left(\vec{r},t\right)=\frac{1}{4\pi}\int_{\sigma'}\frac{\partial}{\partial n_{\sigma'}}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_{\sigma'}\right|}\right)g'\left(\vec{r}_{\sigma'},t\right)d\sigma'.$$

В этом случае двумерное сингулярное интегральное уравнение (7) примет вид [11]:

$$\frac{1}{4\pi}\int_{S}\frac{\partial}{\partial n}\frac{\partial}{\partial n_S}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_S\right|}\right)g(\vec{r}_S,t)dS=$$

$$=f\left(\vec{r}_S,\tau\right)-\frac{1}{4\pi}\int_{\sigma}\frac{\partial}{\partial n}\frac{\partial}{\partial n_\sigma}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_\sigma\right|}\right)g(\vec{r}_\sigma,t)d\sigma+$$

$$+\frac{1}{4\pi}\int_{\sigma'}\frac{\partial}{\partial n}\frac{\partial}{\partial n_{\sigma'}}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_{\sigma'}\right|}\right)g'(\vec{r}_{\sigma'},t)d\sigma'+$$

$$+\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{\partial}{\partial n}\frac{\partial}{\partial n_{S'}}\left(\frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}_{S'}\right|}\right)g'(\vec{r}_{S'},t)dS',\ \vec{r}\in S.$$

Таким образом, для решения задачи о нестационарном обтекании летательного аппарата вблизи твердой поверхности раздела сред используется двумерное сингулярное интегральное уравнение, особенности решения которого в применении к методу дискретных вихрей описаны в работах [9, 10].

ВЫВОДЫ

Для своевременной ликвидации последствий аварийного разлива нефтепродуктов перспективно применение беспилотных летательных аппаратов.

Задача о поведении концевых вихрей, стекающих с крыла беспилотного летательного аппарата и формирующих зону покрытия пятна загрязнения, может быть решена методом конечных вихрей в нестационарной нелинейной постановке вблизи твердой плоскости раздела сред (поверхности земли).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бугаенко О. М.** Обезвреживание нефтяных загрязнений компонентов геосферы сорбентами и биодеструкторами, которые транспортируются многофазными потоками : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01 ; защищена 11.09.09 / Бугаенко Олег Михайлович. – Николаев, 2009. – 173 с.
2. **Пат. 84273 Україна, МПК A62C13/00, F41A5/00.** Авіаційна бомба для розпилення та активації речовини / Захматов В. Д., Щербак М. В. ; заявник і володілець патенту Захматов В. Д. – № а200500809 ; заявл. 31.01.05, опубл. 10.10.08, Бюл. № 19. – 3 с. : іл.
3. **Щербак М. В.** Новые технологии локализации рóзливов нефти в море / М. В. Щербак, В. Д. Захматов, С. О. Ковалев, В. В. Гайдей // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 6 (242). – С. 55–57.
4. Математическое моделирование плоско-параллельного отрывного обтекания тел / С.М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ, Р. М. Федоров ; под общ. ред. С. М. Белоцерковского. – М. : Наука, 1988. – 232 с.
5. Математическое моделирование при формировании облика летательного аппарата / В. В. Гуляев [и др.] ; под ред. В. А. Подобедова. – М. : Машиностроение, 2005. – 496 с.
6. Нелинейная теория крыла и ее приложения / Т. О. Аубакиров, С. М. Белоцерковский, А. И. Желанников, М. И. Ништ. – Алматы : Гылым, 1997. – 448 с.
7. **Белоцерковский С. М.** Исследование на ЭВМ аэродинамических и аэроупругих характеристик винтов вертолетов / С. М. Белоцерковский, Б. Е. Локтев, М. И. Ништ. – М. : Машиностроение, 1992. – 219 с.
8. **Белоцерковский С. М.** Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью / С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
9. Учет земли при расчете нестационарного обтекания летательных аппаратов / А.В. Головнев, С. М. Еременко, А. И. Желанников, С. И. Некраха // Аэродинамика летательных аппаратов : материалы XVI школы-семинара (3–4 марта 2005, п. Володарского). – М. : ЦАГИ, 2005. – С. 46.
10. **Лифанов И. К.** Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент (в математической физике, аэродинамике, теории упругости и дифракции волн) / И. К. Лифанов. – М. : Янус, 1995. – 521 с.
11. **Белоцерковский С. М.** Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике / С. М. Белоцерковский, И. К. Лифанов. – М. : Наука, 1985. – 256 с.

Поступила в редакцию 14.04.2014

У нестаціонарній нелінійній постановці розглянуто математичну модель розрахунку обтікання літального апарата поблизу твердої площини розділу середовищ. Математичне моделювання і розрахунок аеродинамічних характеристик літальних апаратів з урахуванням площини розділу середовищ сприяють прийняттю вірних конструкторських рішень у процесі проектування перспективних літальних апаратів.

One be examined mathematic model for calculation of flow of aircraft in non-standard nonlinear position near media division solid plane. Mathematic simulation and calculation of aerodynamic characteristics of aircraft taking into account media division plane contribute to make right design decisions when perspective aircrafts are designed.