

эксплуатационные затраты. При этом расходы на электроэнергию уменьшаются в 1,5–3 раза в зависимости от региона, где устанавливается оборудование для быстрого охлаждения молока.

Список литературы

1. Цой Ю.А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю.А. Цой. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 424 с.
2. Эглит А.Я. Проблемы холодоснабжения молокозаводов / А.Я. Эглит, В.В. Кириллов, А.А. Брусенцев. // Холодильная техника. – 2012. – №12. – С. 26–27.

Проведено дослідження з вибору холодоносія з низькою температурою замерзання для охолодження молока на фермах. Запропоновано як холодоносій в охолоджуючих установках використовувати Екосол-40. Розроблено і досліджено систему охолодження молока на фермах, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати і підвищити надійність роботи обладнання.

Система охолодження, молоко, холодоносій, охолоджувач молока.

The researches on the choice of refrigerants with a low freezing point for cooling milk on the farm are carried out. Proposed as a coolant in the cooling units use Ecosol-40. Developed and investigated cooling of milk on farms, reduce operating costs and improve the reliability of the equipment.

The cooling system, milk, refrigerant, milk cooler.

УДК 530(075.8)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ВЕТРА

Р.А. Амерханов, доктор технических наук

К.А. Гарькавый, кандидат технических наук

Кубанский государственный аграрный университет, Россия

Приведена математическая модель трехмерного турбулентного потока. Изложен метод анализа распространения в атмосфере техногенных примесей под действием ветра.

Турбулентный поток, межфазовый поток, метод Галеркина, распространение примесей, распространение облаков.

Одна из актуальных проблем, волнующая человечество и требующая свое решение, – это загрязнение окружающей среды. Существенный отрицательный экологический эффект вызван выбросом в атмосферу аэрозолей, содержащих твердые частицы. Для решения этой проблемы необходимо, в числе других способов, изучить закономерности распростра-

нения этих выбросов. Атмосфера, загрязненная антропогенными выбросами, представляет собой гетерогенную многофазную среду.

Технологические процессы, при которых имеют место химические реакции и теплофизические превращения, сопровождаются большим количеством выбросов, вредных для окружающей среды. Значительная часть вредных ингредиентов попадают в атмосферу. Под действием ветра они могут распространяться в пространстве, а затем выпадать на землю, что может нанести значительный вред окружающему растительному и животному миру.

Эти явления подчиняются закономерностям гидродинамики многокомпонентных сред. Кроме того, в многокомпонентной среде имеют место молекулярная и кинетическая диффузия.

Под действием солнечной радиации и потока ветра аэродинамическое поле перемещается, расширяет свой объем и поэтому, выпадая может покрыть большой участок Земли.

Анализ гидродинамики указанных явлений позволит указать путь уменьшения степени вреда от техногенных выбросов.

Цель исследований – определение закономерности распределения примеси в атмосфере и указание метода уменьшения интенсивности их распространения.

Материалы и методика исследований. Анализ обмена импульсами между компонентами техногенной среды проводится методом моделирования гидродинамики процесса. При этом учитывается вероятность действия ветра.

Результаты исследований. Интенсивность обмена импульсом между компонентами выражается отношением:

$$P_{ji} = -P_{ji} = R_{ji} + J_{ji} v_{ji}; (i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j). \quad (1)$$

В этой формуле R_{ji} – межкомпонентная (межфазная) сила, отнесенная к единице объема смеси и обусловленная силами трения, давления, сцепления между компонентами. Так как фазовые превращения имеют место на границе между фазами (компонентами), то величину v_{ji} следует рассматривать как скорость i -й фазы на границе с j -й фазой. В гетерогенных системах с вязкими жидкостями на межфазовых границах отсутствуют скачки скорости и поэтому $v_{ij} = v_{ji}$. В таком случае

$$R_{ji} = -R_{ij}. \quad (2)$$

Интенсивность обмена энергией между фазами представляется в виде уравнения:

$$E_{ji} = W_{ji} + Q_{ji} + J_{ji} v_{ji} (u_{ji} + 1/2 v_{ji}^2) \quad (3)$$

При этом $E_{ji} = -E_{ij}; (i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j)$.

В этом уравнении первый член выражает приток энергии в i -ю фазу за счет работы W_{ji} межфазных (межкомпонентных) сил, а именно трения, давления, взаимного сцепления и др.; второй член уравнения – приток энергии за счет теплообмена Q_{ji} на границе фаз. Последний член урав-

нения выражает перенос внутренней u_{ji} кинетической $1/2 v_{ji}^2$ энергии вместе с переносом массы из одной фазы в другую.

В уравнении (1) – (3) – приняты обозначения: P_y – интенсивность обмена импульсом между j -й и i -й фазами; R_0 – полная межфазовая сила со стороны j -й фазы на i -ю и отнесенная к единице объема смеси, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$; v_{ji} – скорость массы, претерпевающий фазовый переход, $\text{м}/\text{с}$; E_y – интенсивность обмена энергией между i -й и j -й фазами в единице объема смеси в единицу времени, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; W_y – работа межфазных сил i -й фазы на межфазной границе с j -й фазой, отнесенная к единице объема смеси, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; J_{ji} – интенсивность фазовых переходов или фазовых переходов при переносах массы в единице объема смеси из j -й фазы в i -ю $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; μ_y – внутренняя энергия.

Заслуживает внимания вопрос о структуре скорости потока при $Z > Z_0$. Многочисленные исследования показывают, что в нижнем слое атмосферы средняя скорость изменяется по высоте по логарифмической зависимости. На основе исследований определена зависимость [1]:

$$\frac{d\bar{V}_B(z)}{dz} = \frac{V_*}{\wp} g \left(\frac{h_0}{z} \right), \quad (4)$$

где V_B – среднее значение скорости, $\text{м}/\text{с}$; $V_* = \sqrt{\tau/\rho}$; τ – напряжение трения; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; $\wp = 0,38 - 0,4$ – постоянная Кармана; h_0 – высота шероховатостей почвы, м .

Согласно выводам из теории подобия, изменения скорости ветра с высотой во всех случаях должны определяться универсальной функцией $f(\xi)$ от безразмерной высоты $\xi = \frac{z}{L}$, где $L = -c_p \rho_0 T_0 u_*^3 / xgq$ [2]. Для непосредственной проверки этого результата и установления точного вида функции $f(\xi)$ надо иметь наряду со значениями $\bar{u}(z)$ также и значения величины $u_* = \left(\frac{\tau}{\rho_0} \right)$ и q , позволяющие подсчитать масштаб L . Однако непосредственные измерения турбулентных потоков q и τ в приземном слое атмосферы начали проводиться лишь сравнительно недавно и до сих пор являются относительно немногочисленными и довольно неточными.

Возможен и иной подход при анализе распространения в атмосфере примесей под воздействием ветра.

В работе [3] исследуется распространение облака примеси под действием ветра. При этом учитывается процесс турбулентной диффузии, а также вертикального профиля скорости ветра. Авторами рассматриваются как двумерное, так и трехмерное распространения примеси. Трехмерная задача позволяет учитывать турбулентную диффузию, как в вертикальном направлении, так и в направлении, перпендикулярном скорости ветра.

Распространение примеси под действием ветра в ее вертикальной диффузии, имеет вид:

$$u(=)\partial_x n(x, z) = D_t [\partial_z n], \quad (5)$$

где $n(x, z)$ – числовая плотность молекул примеси.

Коэффициент турбулентной диффузии D_t можно записать в стандартном виде так:

$$D = \delta(r),$$

где δ – коэффициент шероховатости, как правило, находится в пределах 0,01 – 0,4 м и зависит от свойств подстилающей поверхности, вдоль которой распространяется примесь.

В приземном слое часть примеси может всасываться почвой. Облако примеси в основном распространяется в атмосферу:

$$\frac{\partial n(x, 0)}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

Будем рассматривать простейший вид начальных условий для задачи о распространении: на расстоянии от земли до высоты числовая плотность примеси постоянна:

$$n(0, z) = n_0, \quad (7)$$

на остальной высоте ее числовая плотность равна нулю. Очевидно, что начальное условие (3) согласуется с граничным условием (6). Отметим, что условие (7) является аппроксимацией распределения примеси о высоте над подстилающей поверхностью, ранее полученного в [4]. Учет более реалистических профилей числовой плотности возможен, но практически мало влияет на выходы этой работы.

Прежде чем выполнять численное моделирование, проведем качественный анализ задачи, используя метод Галеркина. Будем искать решение (5) в виде:

$$n(x, z) = A(x) \exp[-2z^2 / h^2] \quad (8)$$

Отметим, что выражение (8) точно удовлетворяет граничным условиям (5), (6), что, как правило, существенно повышает точность применения метода Галеркина [5]. Подставляя (8) в уравнение (4) и используя метод Галеркина, для неизвестной функции $A(x)$ получаем уже обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$k_0 \frac{dA}{dx} = -Ak_1, \quad (9)$$

где

$$k_0 = \int_0^\infty u(z) \exp[-4z^2 / h^2] dz, \quad k_1 = \frac{8}{h^4} \int_0^\infty D(z) z^2 \exp[-4z^2 / h^2] dz.$$

В приближении постоянной скорости приземного потока u_0 интервалы легко вычисляются аналитически, в результате решение уравнения (9) имеет вид:

$$A(x) = A_0 \exp[-k_1 x / k_0] = A_0 \exp[-Dx / h^2 u_0] \quad (10)$$

Как следует из выражения (11), плотность примеси экспоненциально убывает по мере удаления от начального источника. Введем, исполь-

зую выражение (10) характерную длину l рассеяния облака молекул примеси вследствие турбулентной диффузии

$$l = \frac{u_0 h^2}{D} = \frac{h^2}{\delta}. \quad (11)$$

Обратим внимание на то, что характерная длина рассеяния l не зависит от скорости ветра. В частности, при $h=1$ м и $\delta=0,1$ м имеем, что $l = 10$ м.

Увеличение величины δ и, следовательно, коэффициента турбулентной диффузии приводит к существенному уменьшению числовой плотности примеси на высотах до 2 м. На этих высотах практически исчезает зависимость от координаты, другими словами, профиль числовой плотности молекул примеси выхолаживается. Таким образом, увеличение коэффициента шероховатости приводит к увеличению диффузионного потока в вертикальном направлении и уменьшению плотности молекул примеси на высотах, сравнимых со средним ростом человека (~ 2 м), и на сравнительно небольших расстояниях от начала распространения облака.

В трехмерном случае уравнение конвективной диффузии примеси имеет вид:

$$u(z)\partial_x n(x, y, z) = D_l [\partial_{zz} n + \partial_{yy} n] \quad (12)$$

При этом ставится дополнительное граничное условие:

$$n(x, \pm\infty, z) = 0. \quad (13)$$

С помощью метода Галеркина будем искать приближенное решение трехмерного уравнения в следующем виде:

$$n(x, y, z) = n(x, z) \exp[-4y^2 / W^2] \quad (14)$$

где W – ширина пролива жидкости, которая является источником паров, м.

Таким образом, с помощью выражения (14) и метода Галеркина удастся свести трехмерную задачу о распространении к двумерной со стоком. Фактически введенная функция $n(x, z)$ описывает значение плотности в центре распространяющегося облака, а экспоненциальный член приближенно описывает уменьшение числовой плотности за счет диффузии в направлении, перпендикулярном направлению ветра. Ясно, что для достаточно широкого пролива значение в центре облака будет совпадать с решением двумерной задачи. Заметим, что выражение (14) точно удовлетворяет граничному условию (13).

Этот вывод подтверждается при анализе экспериментальных данных. При этом величина l не зависит от скорости ветра. Ее значение определяется начальным вертикальным размером облака примеси и обратно пропорционально коэффициенту шероховатости подстилающей поверхности.

Выводы

Увеличение коэффициента турбулентной диффузии примеси существенно усиливает рассеивание примеси в ветровом потоке. Кроме того, определены границы распространения примеси в воздухе. В силу вертикальной диффузии примеси на достаточно большом расстоянии x кривая 2 имеет такое поведение, что и кривая 1. Другими словами, отнормиро-

ванная числовая плотность молекул примеси в области, ограниченной сверху кривой 2, больше 10^{-2} [1].

Список литературы

1. Катков В.Л. Математическое моделирование ветрового переноса загрязнений / В.Л.Катков. – Минск: Изд-во БГУ, 2005. – 88 с.
2. Котов Г.В. Моделирование распространения облака примесей под действием ветра в приземленном слое / Г.В.Котов, С.П.Фесенко. // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, №3. – С. 535 – 539.
3. Лазеров Н.П. Топливо-энергетические ресурсы / Н.П.Лазеров // Вестник РАН. – 2006. – №5. – С. 398 – 408.
4. Монин А.С. Атмосферная диффузия / А.С.Монин. // Успехи физических наук. – М. 1959. – К. 1. – С. 119 – 130.
5. Монин А.С. Безразмерные характеристики в приземном шаре атмосферы / А.М.Монин, А.М.Обухов. // Докл. АН СССР, 1993. – №2. – С. 223 – 226.
6. Монин А.М. Новое о климате / А.А.Брестов, А.М.Монин. // Вестник РАН. – 2005. Т. 75, – №2. – С. 126 – 138.

Наведено математичну модель тривимірного турбулентного потоку. Викладено метод аналізу поширення в атмосфері техногенних домішок під дією вітру.

Турбулентний потік, міжфазовий потік, метод Галеркіна, поширення домішок, поширення хмар.

A mathematical model of three-dimensional turbulent flow. A method for analyzing the propagation of man-made contaminants in the atmosphere by the wind.

Turbulent flow, interphase flow, Galerkin method, distribution of impurities, distribution of clouds.

УДК 621.47: 677.057

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ИЗ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

***И.К.Жмакин, кандидат технических наук
Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва
Л.И. Жмакин, доктор технических наук
А.А. Крюков, кандидат технических наук
Московский государственный университет дизайна
и технологии, г. Москва***

Описан солнечный коллектор для нагрева воды, абсорбер которого изготовлен из водостойкой ткани с полимерным покрытием. Проведены экспериментальные исследования его теплотехнических характери-